

## 생태계 모델링을 이용한 진해만의 자생 COD 평가

홍 석 진 · 이 원 찬 · 박 종 수 · 오 현 택 · 윤 상 필 · 김 형 철\* · 김 등 명\*\*  
국립수산과학원 환경연구팀, \*국립수산과학원 서해수산연구소, \*\*부경대학교 생태공학과  
(2007년 4월 17일 접수; 2007년 8월 10일 채택)

### Ecological Modeling for Estimation of Autochthonous COD in Jinhae Bay

Sok Jin Hong, Won Chan Lee, Jong Soo Park, Hyun Taik Oh,  
Sang Pil Yoon, Hyung Chul Kim\* and Dong Myung Kim\*\*

Environmental Research Team, National Fisheries R & D Institute, \*West Sea Fisheries  
Research Institute, Busan 608-080, Korea

\*\*Division of Environmental System, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea  
(Manuscript received 17 April, 2007; accepted 10 August, 2007)

The three-dimensional eco-hydrodynamic model was applied to estimate the autochthonous COD caused by production of phytoplankton in Jinhae Bay. A residual current was simulated, using a hydrodynamic model, to have a slightly complicated pattern in the inner part of the bay, ranging from 0.001 to 5 cm/s. In the outer part of the bay, the simulated current flowed out to the south sea with a southward flow at a maximum of 25 cm/s. The results of the ecological model simulation of COD levels showed high concentrations, exceeding 4 mg/L, in the inner bay of Masan, an area of wastewater discharge, and lower levels, approaching less than 1 mg/L, closer to the outer part of the bay. The simulation results of Autochthonous COD by two methods using ecological modeling, showed high ratio over 70% of total COD. Therefore, it is more important to consider nutrients than organic matters in the region for control COD standard.

Key Words : Ecological model, Autochthonous COD evaluation, Jinhae Bay

#### 1. 서 론

진해만은 급격한 산업화, 도시화 등으로 환경용량을 초과한 육상기원 오염물질 유입으로 인해 부영양화가 진행되어 해마다 상습적인 적조발생, 빈산소 수괴 형성 등 해양환경이 심하게 오염된 반폐쇄성 내만해역 중의 하나로 알려져 있으며, 하천을 통해 유입되는 질소·인과 같은 과량의 무기영양염류를 이용하여 식물플랑크톤의 증식이 활발하게 일어나 해역의 생산성이 매우 높은 곳이다<sup>1)</sup>.

해역의 유기물은 현지성과 외래성 유기물로 나눌 수 있는데, 전자는 주로 식물플랑크톤 기원이고 후자는 하천 및 대기를 통해 공급되며 연안역에서는

그 기여율이 매우 크다. 또한, 화학적 산소요구량(COD)은 이러한 외부유입유기물과 해역에서 생성된 자생유기물이 환경에 미치는 영향을 파악하는데 유용한 지표가 될 수 있다<sup>2)</sup>. 어떤 해역에서 측정된 COD 값은 육상으로부터의 유입에 의한 외래성 COD(allochthonous COD)와 내부의 영양염을 이용하는 성장하는 조류로부터 기인하는 해역 자체 내 부생산에 의한 자생 COD(autochthonous COD)의 합으로 표현할 수 있다<sup>3)</sup>. 이렇게 내부생산에 의해 증식한 식물플랑크톤은 대규모 증식 후 사멸할 때, 산소를 소모하는 유기물질이 될 뿐만 아니라, 동물플랑크톤의 현존량을 증가시키며, 유기물질의 세포외 분비를 통해 용존 유기물질을 증가시키는 등 여러 가지의 생화학적 과정을 통해 해역의 COD 농도를 증가시킨다. 그러므로 해역의 하·폐수에 의한 유기오염 정도를 표현하는 COD 농도를 자생 COD와 외래성 COD가 각각 어느 정도의 비율로 기여하

Corresponding Author : Sok Jin Hong, Environmental Research Team, National Fisheries R&D Inst., Busan 608-080, Korea  
Phone: +82-51-720-2255  
E-mail: sj@nfrdi.re.kr

는 가를 정량적으로 파악하는 것은, 수질관리 정책의 결정에 도움이 될 것이다<sup>4,5)</sup>. 그러나, COD의 측정만으로는 자생 COD와 외래성 COD의 구분이 불가능하기 때문에, 수계내의 총 유기물 농도 중 자생 유기물이 차지하는 비율을 밝히기 위해서 많은 연구가 이루어져 왔다. Nakanishi<sup>6)</sup>는 부영양화된 해역에서의 자생 COD를 평가하기 위하여 Chl.a와 COD의 일차 상관식을 이용하여 자생 COD를 계산하였으며, ΔCOD법, 염분농도 이용 계산법 등 비교적 간단하게 자생 COD를 평가할 수 있는 방법을 제시하였고, Fallen과 Thomas<sup>7)</sup>는 <sup>14</sup>C를 이용하여 남조류 bloom이 일어난 수역의 자생 BOD를 산정하였다. 국내에서는 신<sup>8)</sup>의 낙동강에서의 자생 BOD를 고려한 수질관리에서 하천수에서의 식물플랑크톤 증식량을 Chl.a 값으로 나타내어 BOD 농도와의 상관성에 관한 연구를 수행하였고, 낙동강에서 식물플랑크톤의 생산이 BOD에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, 김과 이<sup>9)</sup>는 금강수계를 대상으로 한 수질관리를 위해 자생 BOD를 배양 실험을 통해 산정한 바가 있다. 또한, 신 등<sup>10)</sup>은 낙동강 하구해역에서 관측된 자료를 바탕으로 Nakanishi의 3가지의 자생 COD평가 방법을 비교 하였다. 그리고, 모델링을 이용한 방법으로는 김<sup>11)</sup>이 진해만에서 식물플랑크톤의 내부유기물 생산량을 계산하는 법을 적용한 이래로, 김<sup>12)</sup>이 COD<sub>load,0</sub>를 이용하여, 시화호에서의 자생 COD의 양을 시뮬레이션 하였으며, 엄<sup>13)</sup>도 마산만에서 COD<sub>difference</sub> 방법을 이용하여 자생 COD의 양을 계산한 바 있다.

따라서, 본 연구에서는 1) Nakanishi가 정리한 ΔCOD 방법을 통해 간단하게 진해만 해역의 자생 COD를 계산하고, 생태계 모델링을 이용하여 2) ΔCOD<sub>load,0</sub> 방법과 3) ΔCOD<sub>difference</sub> 방법으로 자생 COD를 평가하였으며, 각 평가법에 대한 적용성을 비교 검토하여 부영양화된 해역의 수질관리 방안의 기초 자료로 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

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

생태-유체역학모델은 해수유동 모델과 생태계 모델로 구성되어 있으며, 연안역 수질의 재현과 평가에 유용한 수단이 될 수 있다. 특히 생태계에 대한 총괄적인 접근을 위해서는 해역내에서 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 질소 및 인의 순환을 포함한 생태학적 관련인자의 관계를 포함한 생태계 모델의 이용이 필수 불가결하다. 본 연구에서는 해수유동 모델은 中田 등<sup>14)</sup>에 의해 개발 적용되어진 다층모델이며 생태계 모델은 Kremer와 Nixon<sup>15)</sup>에 의

해 개발, 적용된 모델의 지배방정식을 바탕으로 Nakata 등<sup>16)</sup>에 의해 grid 모델 형태로 구성되어 있다. 이 모델링 시스템은 최 등<sup>17)</sup>, 김 등<sup>18)</sup>에 의하여 국내 연안환경에 적합하도록 연구 개량되어 그 적용성이 검토되었으며, 진해만과 마산만 해역에서 기초생산생태계와 환경용량산정에 주로 이용되어왔다.

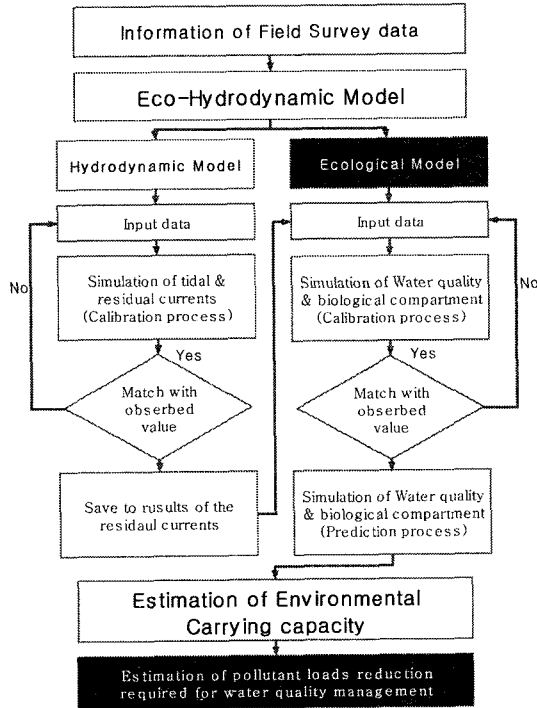


Fig. 1. Schematic diagram of eco-hydrodynamic model.

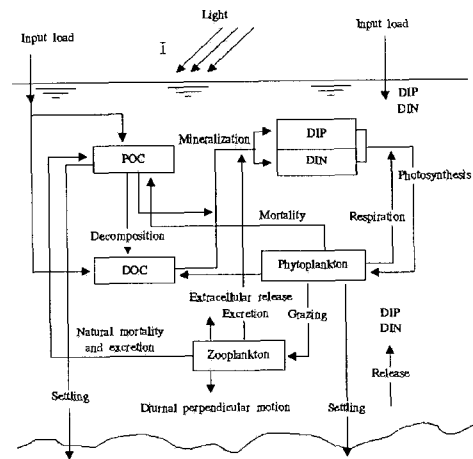


Fig. 2. Schematic diagram of biogeochemical cycle in the lower trophic marine ecosystem of the ecological model.

생태계 모델링을 이용한 진해만의 자생 COD 평가

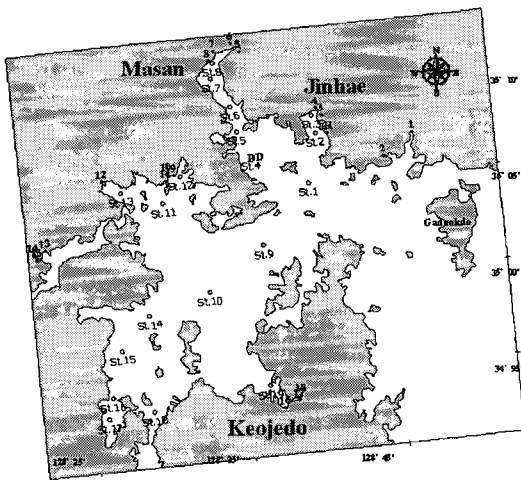


Fig. 3. The sampling site in Jinhae Bay area.(blanked circle for sampling sea water quality and solid circle for sampling land based pollution sources)

생태-유체역학 모델의 기본 구조는 Fig.1에 나타나 있다.

본 연구에서 사용된 해수유동 모델 Code인 COSMOS(Multi-Level Model: COSMOS)는 조석이 침입하는 내만에서 밀도류계의 3차원 해석을 위한 유체 해석 프로그램으로, 부영양화 대책, 오염물의 확산 및 공장 매립에 대한 평가 등에 있어서 기본이 되는 역학 모델 중의 하나로서 생태계모델을 위한 유동장의 모델로서도 이용할 수 있다<sup>19-21</sup>. 본 모델은 내만 및 하구에서 유체의 운동을 정식화한 운동방정식, 연속방정식, 조위의 변화를 정식화한 방정식, 염소량 확산방정식, 열(수온)의 확산방정식 및 해수의 밀도와 염소량, 수온과의 관계를 정식화한 상태방정식으로 구성된다<sup>22,23</sup>. 또한, 본 연구에서 적용된 생태계모델(EUTROP2)은 8개의 구성요소, 즉, 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 입자유기탄소

Table 1. Input data for an ecosystem model

Parameters		Input values							
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 500m$							
Water depth		chart datum + MSL							
Time interval		600sec							
Initial condition for compartments									
Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	(mg/L)		$(\mu g-at/L)$		$(mgC/m^3)$				
1	9.0	2.00	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0	
2	9.0	2.00	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0	
3	5.0	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0	
4	5.0	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	300.0	50.0	
5	3.0	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	200.0	50.0	
Boundary condition for compartments									
Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	(mg/L)		$(\mu g-at/L)$		$(mgC/m^3)$				
A	1	8.40	2.00	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0
	2	8.40	2.00	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0
	3	8.40	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0
	4	7.57	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	300.0	50.0
	5	7.57	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	200.0	50.0
B	1	8.40	2.00	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0
	2	8.40	2.00	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0
	3	8.40	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	500.0	50.0
	4	7.57	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	300.0	50.0
	5	7.57	2.50	2.00	10.0	600.0	800.0	200.0	50.0
Horizontal viscosity coefficient	3.0 E5 (cm <sup>2</sup> /s)								
Horizontal diffusion coefficient	3.0 E5 (cm <sup>2</sup> /s)								
Vertical diffusion coefficient	Level 1 : 1.0 (cm <sup>2</sup> /s), Level 2~Level 5 : 0.01 (cm <sup>2</sup> /s)								
Calculation time	200 tidal cycles								

(POC), 용존유기탄소(DOC), 용존무기인(DIP), 용존 무기질소(DIN), 용존산소(DO) 및 화학적 산소요구량(COD)등으로 이루어져 있으며, 해양생태계 내의 각 구성요소들 사이에 질소(N), 인(P) 및 산소(O<sub>2</sub>)의 생화학적 순환 과정을 수식화 하였다(Fig. 3)<sup>24)</sup>. 본 모델은 영양염의 이동경로를 쉽게 파악할 수 있고 해역의 부영양화현상과 관련된 제과정의 이해와 그들의 제어를 위한 목적으로도 이용 가능하다<sup>25,26)</sup>.

2.2. 모델링 수행

본 연구의 모델 영역은 김<sup>11)</sup>과 최<sup>27)</sup>의 연구에서 구분하였던 것과 같이 진해만 전체를 마산만과 행암만, 진동만, 당항만, 고현성만 등 5개의 만을 포함한 진해만 전체 해역(Fig. 2)을 대상으로 3차원 유동 시뮬레이션을 실행하였다. 모델 영역은 외해 개방 경계를 가덕도 남단과 거제도 동안을 가로질러 연결하는 선과 거제도 서안과 통영해만을 연하는 선으로 설정하였고, 모델 영역을 동서방향 및 남북 방향으로 동일하게 500 m의 정방 격자로 이루어진

37,350개 (90×83×5)의 격자망으로 구성하였으며, 수층은 진해만의 밀도 및 수온 약층의 깊이를 고려하여 5개의 층으로 구별하였다. 진해만 인근해역을 포함한 남해안 일대에서 연중 가장 안정한 유동이 조류이고 가장 탁월한 조석이 M2분조이므로 모델 영역 내에서 해수 유동을 재현하기 위해서 M2분조를 평균 조석으로 하여 적용하였다. 개경계에서 진폭과 위상은 가덕도 남단은 57.5 cm, 244.7도 이었으며 거제도 동안은 57.5 cm, 247.5도를 적용하였으며, 두 지점 사이의 각 격자점의 진폭과 위상은 보간법에 의해 계산하여 적용하였다. 지형 및 수심은 해도 No. 206, No. 204(국립해양조사원, 2004)를 참조하였으며, 진해항 및 행암만 일부의 군사시설의 경우 주변지형과 개략적으로 맞도록 보간 하여 이용하였다. 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙하였고 여름철에 바람이 없는 빈도수가 높아 모델에서는 0.0 m/sec의 조건으로 입력 하였다. 해저마찰계수는 해저지형과 관계가 있고, 해수의 흐름에 큰 영향을 주는데, 일반적으로 해의 안정성을 주는  $k=0.0025$ 를 적용하였다. 수평 확산계수는 마산만이나 원문만의 경

Table 2. The biological parameters used in the ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit	Used values
1	$\alpha_1$	maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.55
2	$\alpha_2$	respiration rate of phytoplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.10
3	$\alpha_3$	maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.18
4	$\alpha_4$	death rate of phytoplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.01
5	$\alpha_5$	natural death rate of zooplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.054
6	$\alpha_6$	mineralization rate of POC at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.012
7	$\alpha_7$	mineralization rate of DOC at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.005
8	$\alpha_8$	oxygen consumption rate of sediment at 0°C	day <sup>-1</sup>	1.000
9	$K_{SP}$	half saturation constant for uptake of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P at 0°C	μg-at/L	0.30
10	$K_{SN}$	half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	μg-at/L	3.00
11	$I_{opt}$	optimum intensity of radiation for photosynthesis	ly/day	200.0
12	$I_{max}$	maximum intensity of sunlight at sea surface	ly/day	856.0
13	$k_0$	dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m <sup>-1</sup>	0.57
14	$P^*$	function of grazing	mg C/m <sup>3</sup>	75
15	$\mu$	digestion efficiency of zooplankton	%	70
16	$\lambda$	total growth efficiency of zooplankton	%	30
17	$\kappa$	percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC	%	25
18	$K_{DO}^1$	half concentration of DO for mineralization of POC	mg/L	1.0
19	$K_{DO}^2$	half concentration of DO for mineralization of DOC	mg/L	1.0
20	$W_P$	settling velocity of phytoplankton	m/day	0.17
21	$W_{POC}$	settling velocity of detritus(POC)	m/day	0.43
22	[COD:C <sub>P</sub> ]	ratio of COD/C for phytoplankton	-	3.41E-04
23	[COD:C <sub>Z</sub> ]	ratio of COD/C for zooplankton	-	1.51E-03
24	[COD:C <sub>POM</sub> ]	ratio of COD/C for detritus(POC)	-	1.33E-03
25	[COD:C <sub>DOM</sub> ]	ratio of COD/C for DOC	-	1.12E-03
26	$K_a$	reaeration coefficient at sea surface	day <sup>-1</sup>	0.15

우  $3.8 \sim 4.0 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ <sup>27)</sup> 및  $1.1 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ <sup>28)</sup> 으로 조사된 바 있으나, 이와 같은 값을 진해만 전체에 적용하기는 힘들다. 또한, 황해<sup>29,30)</sup>에서  $1.0 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ , 그리고 가막만<sup>31)</sup>에서  $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용한 바 있는데, 본 연구에서는 진해만<sup>31)</sup>에서 적용되었던,  $3.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였고, 수평와동 확산계수와 수평와동 점성계수는  $3.0 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였으며, 연직와동 확산계수는 저층 빈산소를 재현하기 위해 1층에서는  $0.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였고, 그 이하에서는  $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다. Coriolis parameter가 위도에 따라 일정한 f-plane을 사용하였다. 해수유동 모델에서 얻어진 유속 및 조위가 정상상태(steady-state)에 도달한 이후 한 조석주기에 대한 평균유속을 구해 생태계 모델의 기본 유동자료로 입력하였으며, 격자의 구성은 해수유동모델과 동일하고 계산시간 간격( $\Delta t$ )은 600 sec로 하였다. 생태계 모델의 초기치 및 경계치의 입력 자료는 Table 1에, 입력 parameter는 Table 2에 각각 나타내었다.

2.3. 자생 COD의 평가

진해만의 자생 COD를 평가하기 위하여 Table 3에 제시한 4가지 방법 중에서 2가지 생태계 모델링 방법을 사용하였다. 또한,  $\Delta\text{COD}$ 방법을 이용하여 모델링에서 산정한 자생 COD와 비교 평가하였다.  $\Delta\text{COD}$ 법은 연중 수온이 낮아 식물플랑크톤의 광합성 작용이 크게 일어나지 않는 동계에 측정된 COD 농

Table 3. Evaluation methods of autochthonous COD

Methods	Contents
$\Delta\text{COD}$	Observed COD-COD <sub>winter</sub>
Dilution rate	Observed COD-(Dilution rate <input cod)<="" cod+oceanic="" inherent="" td=""/>
Correlation with Chl.a	from Correlation equation COD and Chl.a
by Ecological model	COD <sub>load,0</sub> : input 0 COD load in all condition
	COD <sub>difference</sub> : Total COD - Physical diffusion COD

Table 4. Water quality parameters in Jinhea Bay in Aug. 2003

Level	Sal.	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIN ( $\mu\text{g-at/L}$ )	DIP ( $\mu\text{g-at/L}$ )	Chl-a ( $\mu\text{g/L}$ )	EI	
Surface	Range	17.97~27.19	6.78~13.03	1.73~4.85	5.01~77.84	0.24~15.58	0.88~37.51	1~237
	Mean	23.78	10.77	2.73	23.58	2.32	7.12	40
Bottom	Range	25.89~32.91	0.06~5.83	1.43~3.31	6.87~96.54	0.36~9.52	0.07~5.02	1~309
	Mean	30.07	1.81	2.19	30.41	2.40	1.14	65

도를 하천수의 유기물 유입에 의해서만 결정되는 각 수역의 외래성 COD로 가정하여, 이를 다른 시기에 관측한 COD에서 제한 값을 자생 COD로 간주한다. 이 방법은 가용한 자료가 있을 경우 가장 간단히 자생 COD를 평가할 수 있는데, 본 연구에서는 2003년 3월의 현장 관측한 자료를 사용하였다.

생태계 모델링에서 개략적인 자생 COD 증가의 평가방법은 다음과 같이 정리 할 수 있다. 첫 번째 방법은 입력조건에서 유입되는 COD에 관련된 유기물 항의 값을 0으로 하여, 계산하는 방법으로, 식물플랑크톤 증감에 의해 좌우되는 COD 값을 개략적으로 구할 수 있다.

두 번째 방법은 앞서 언급한 바와 같이 각 생물과정의 수식화를 통해서 해역내의 각각의 형태의 유기물에 대한 단위시간당의 증감량을 구할 수 있기 때문에 전체 COD에서 물리적 이류확산에 의한 COD 값을 제외한 값을 자생 COD로 표현하는 방법이다. 모델내에서의 유기물 변화량은 탄소량으로 나타난 변화량으로, 이 탄소량을 COD 농도로 환산하는 계수를 곱함으로써 COD의 변화량 즉 내부생산 COD를 평가할 수 있다. 여기서, 물리적인 이류확산에 의해 증감하는, 즉 계외 유입에 의해 정의되는 COD 값을 제외할 경우 식물플랑크톤 증감에 의해 좌우되는 자생 COD 값으로 나타낼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 현장관측

진해만 해역의 생태계 모델링의 보정을 위해 조사한 자료를 Table 4에 나타내었다. 이 시기의 진해만 전역의 표층 염분은 평균 23.78로 이 시기에 담수의 영향이 매우 크게 나타난 것으로 보인다. 특히, 표층의 경우 염분이 낮은 곳에서 COD 농도가 높은 경향을 보였다(Fig. 4).

COD의 표층 평균은 2.73 mg/L로 저층에 비해 높게 나타났으며, 저층의 용존산소는 평균 1.81 mg/L로 진해만 특유의 저층 빈 산소 현상이 나타났다. 또한, Okaichi<sup>32)</sup>의 제안 식을 이용하여 부영양화지수(EI)를 계산한 결과 표층에서 1~309로 넓게 분포하였으며, 평균 52로 시화호의 125<sup>12)</sup>에 비해 낮고, 낙동

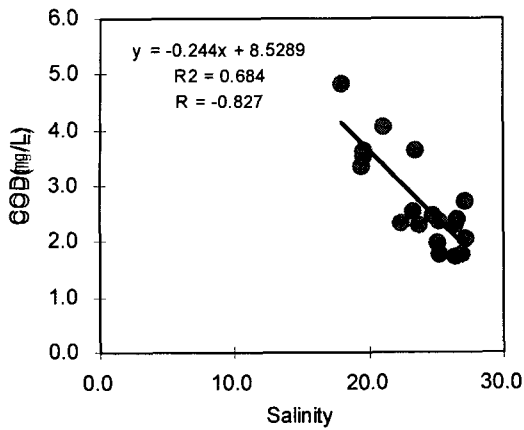
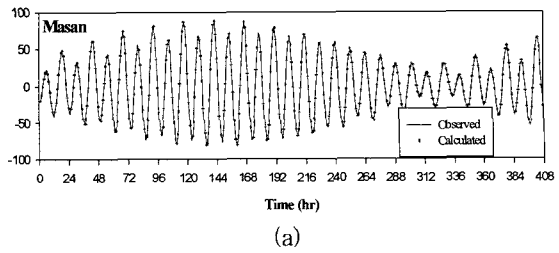


Fig. 4. Correlation of surface COD and salinity.

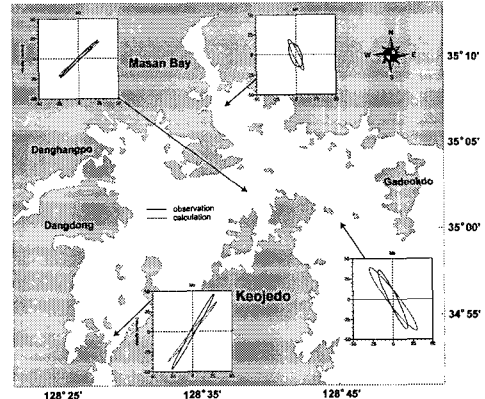
강해구의 하계 값인 44<sup>10)</sup>에 비해 높게 나타났다. 용존 산소는 저층에서 평균 1.81 mg/day로 마산만과 행암만의 내측에서 빈산소 상태가 극심하게 나타났으며, 영양염의 농도가 높아서, 저층의 부영양도 지수(EI)가 65에 달하며, 표층의 식물플랑크톤의 농도 분포도 0.88 ~ 37.51  $\mu\text{g/L}$ 로 곳곳에서 적조가 발생하였다.

### 3.2. 해수유동 모델

마산항 검조소와의 예측 조위와의 조석검증결과( Fig. 5 ~ Fig. 6) 각 조류조사 지점과의 조류타원 궤교 결과( Fig. 7)와 창조와 낙조시( Fig. 8)의 흐름장과, 표·저층의 잔차류의 흐름( Fig. 9)을 나타내었다. 진해만의 창조류는 가덕도 남쪽을 돌아 가덕수로와 나란한 방향으로 유입되며 진해만 서부와 마산만으로 진입하고 있다. 이때 주수로를 따라서 강해계 서북진하는 해수는 대부분은 진해만 서부해역으로 이동하여 만 중앙부에서 느슨하게 진동만, 원



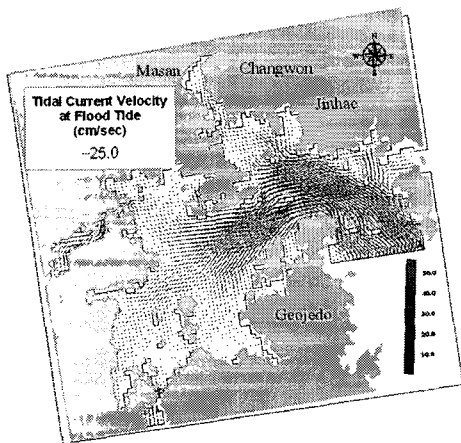
(a)



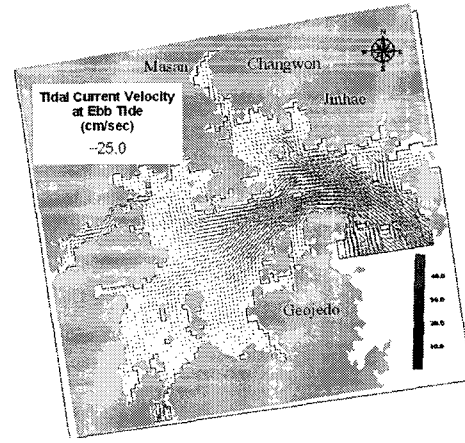
(b)

Fig. 5. Calibration results of hydrodynamic model in Jinhae Bay.

문만, 고현성만으로 이동한다. 북쪽으로 이동한 일부는 마산만과 행암만으로 나누어 유입된다. 이때 유속의 크기를 살펴보면 거제도 북단~잠도 사이의 수로를 통해 창·낙조시 약 40~50 cm/s의 크기로 진입하여, 진해만 중앙부에는 약 20~30 cm/s의 흐름이 나타나며, 만 서부의 내만으로 진행할수록 10 cm/s 이하의 유속을 나타낸다. 북상하던 흐름은 수심이 얕아지는 부도를 지나면서 얕은 수심으로



(a)



(b)

Fig. 6. Calculated tidal current vector at (a) Flood tide and (b) Ebb tide.

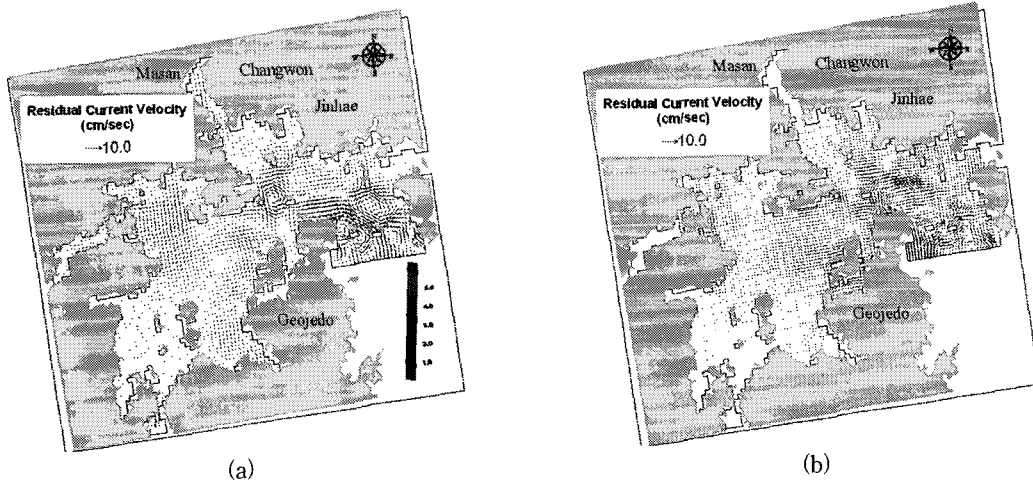


Fig. 7. Calculated residual current in (a) surface level and (b) bottom level.

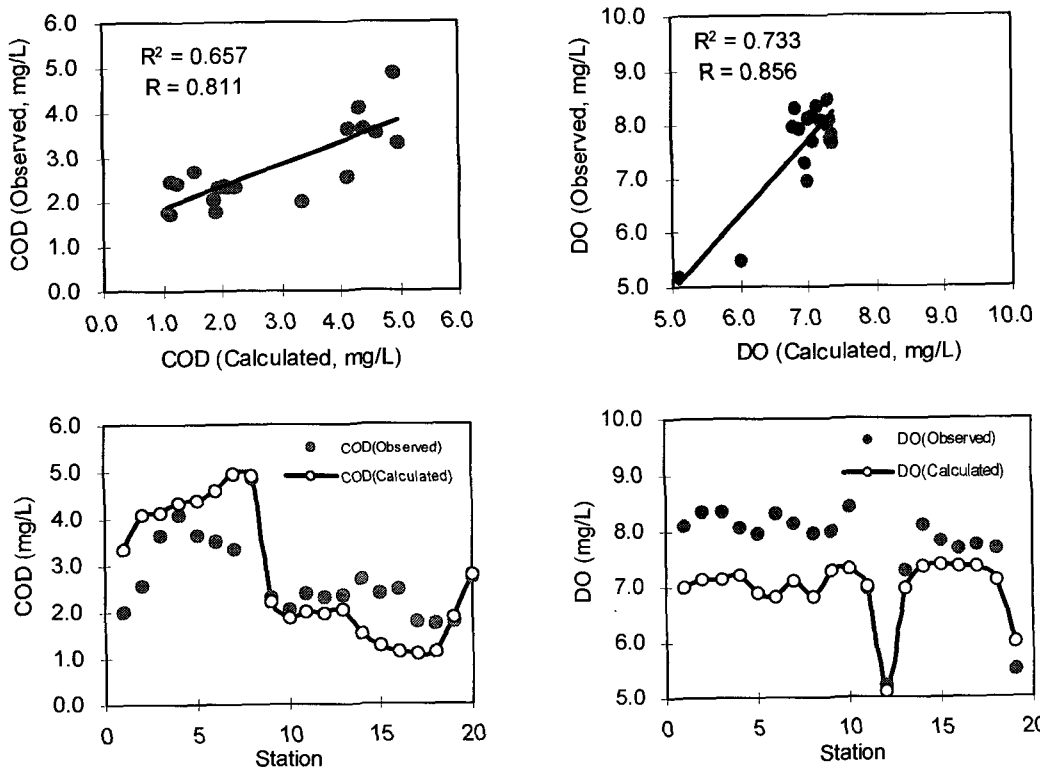


Fig. 8. Comparison of observed and calculated value of COD(upper) and DO(lower) at each station in surface level.

인해 유속이 약 10 cm/s 이하로 현저히 감소하며 마산만 내의 경우 평균 5 cm/s 내외의 유속을 가진다. 층별 흐름의 패턴은 표층~저층까지 거의 유사한 흐름의 형태를 나타내고 있고, 저층으로 갈수록 유속의 크기가 현저히 감소하고 있다. 낙조시의

경우에는 창조시와는 반대의 패턴이 나타나며, 낙조시의 유속이 다소 크게 나타났다. 잔차류의 경우, 수심경사가 급하고 유속이 강하며 외해로 열린 진해만의 중앙수로부터 거제도 북단(표층 최대유속은 약 10~12 cm/s)에서 가장 크게 나타났고, 수심경

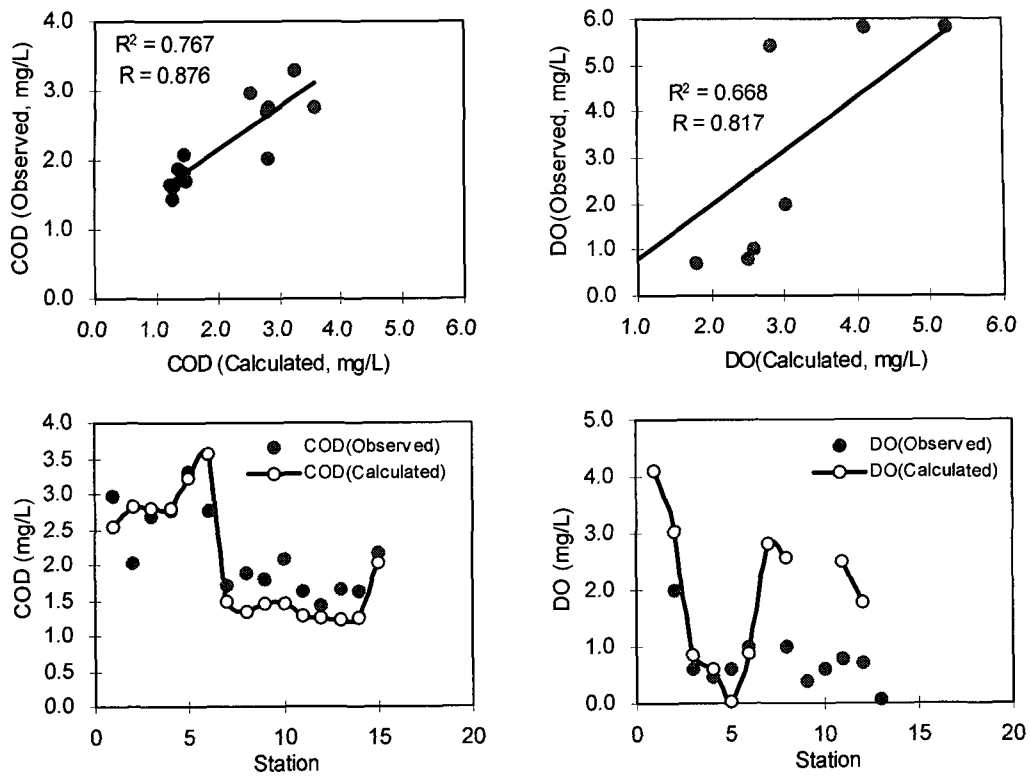


Fig. 9. Comparison of observed and calculated value of COD(upper) and DO(lower) at each station in surface level.

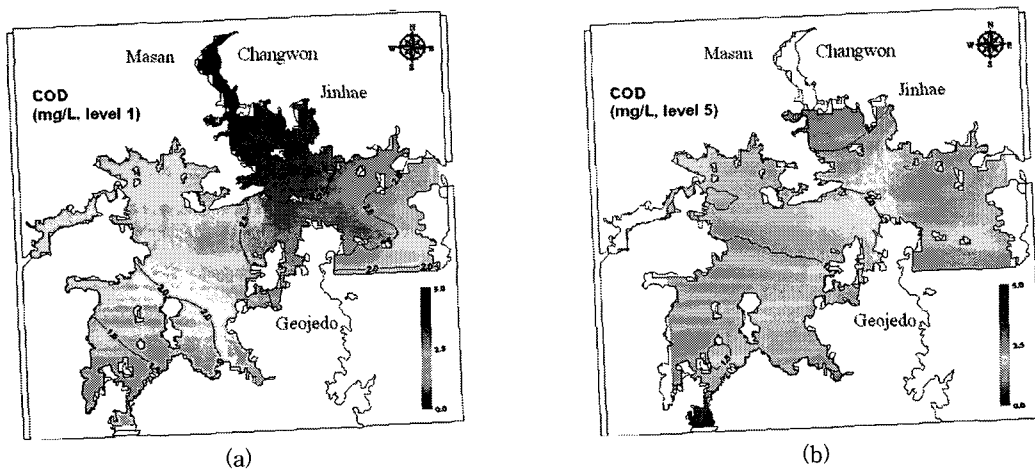


Fig. 10. The current distribution of COD(mg/L) in Jinhae Bay simulated using the ecological model.(left, level 1; right, level 5).

사가 완만하고 유속이 약한 진해만 북부해역과 서부해역(5 cm/s 이하)에서는 약하게 나타났다. 진해만 중앙부에서는 시계방향으로 회전하는 와류가 발생하였다.

### 3.3. 생태계모델

본 연구에서는 대표적으로 COD와 DO를 이용하여 표층과 저층의 관측 값과 계산 값을 비교하였다. 표층 COD의 경우 19개의 현장관측지점의 관측농도



의 평균값은 2.73 mg/L(Table 2) 이었으며, 계산된 COD값은 2.79 mg/L 로 나타나 상대오차는 평균 27.97%였으며, 전 비교 정점에서 비교적 양호하게 나타났다(Fig. 10). 표층 DO의 경우는 관측 값이 7.67 mg/L 이었으며, 계산 값은 6.97 mg/L 로 나타나 상대오차가 9.56%로 전 비교 정점에서 양호하게 나타났다.

저층 COD의 경우 19개의 현장관측지점의 관측농도의 평균값은 2.19 mg/L 이었으며, 계산된 COD값은 1.55 mg/L 로 나타나 상대오차는 20.54%였으며,

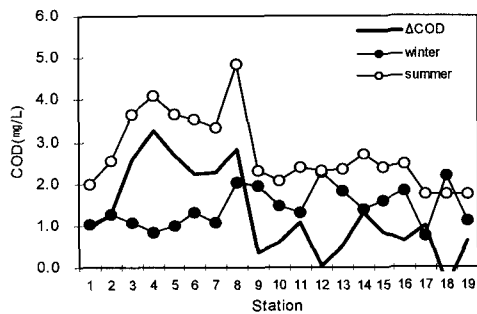


Fig. 11. Calculation results of  $\Delta$ COD.

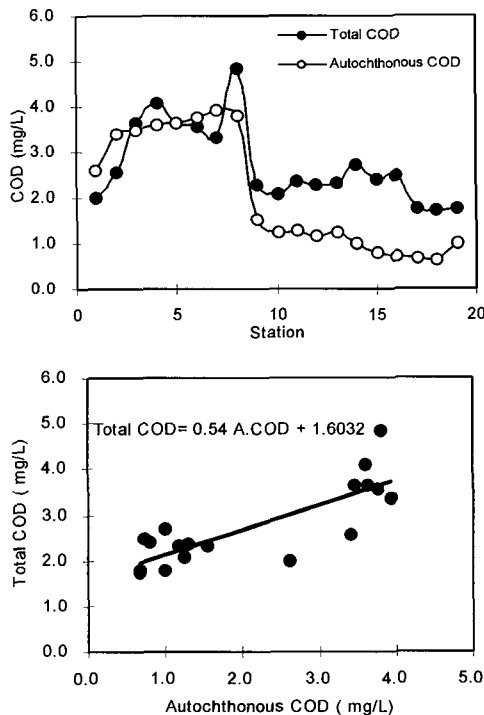


Fig. 12. Relationship of COD and autochthonous COD calculated by ecological modeling by  $\Delta$  COD<sub>load,0</sub> method.

전 비교 정점에서 비교적 양호하게 나타났다. 저층 DO의 경우는 관측 값이 1.35 mg/L 이었으며, 계산 값은 1.07 mg/L 로 나타나 상대오차가 29.38%로 전 비교 정점에서 양호하게 나타났고, 특히 하계 진해만 일원에서 발생하는 빈산소 수괴를 적절하게 표현한 것으로 보인다. 또한, 실측치에 대해 계산치가 적합한지를 판단하기 위하여 각 항목별로 단순회귀 분석을 실시하여 적합성을 검토하였다. 단순회귀 분석결과 실측치와 계산치의 관계정도를 나타내는 상관계수 r(correlation coefficient)은 표층 COD의 경우는 0.811, 저층 COD의 경우는 0.876 로 나타나 실측치에 대한 계산치의 상관성이 높게 재현된 것으로 나타났으며, 표층 DO의 경우는 0.856, 저층 DO의 경우는 0.817 로 나타나 실측치에 대한 계산치의 상관성이 높게 재현된 것으로 나타났다. 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수  $r^2$ (coefficient of determination)은 표층 COD의 경우 0.657로 65.7%가, 저층 COD의 경우 0.767로 76.7%가 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났다. 또한 표층 DO의 경우 0.733로 73.3%가, 저층 DO의 경우 0.668로 66.8%가 표본회귀선에 적합하게 나타났다(Fig. 7~Fig. 8).

### 3.4. 진해만의 자생 COD

#### 3.4.1. $\Delta$ COD법에 의한 자생 COD의 평가

진해만 해역의 생물 생산성이 낮은 동계 COD 농도를 하천수 유입에 의해 공급되는 외래성 COD 농도로 하여, 각 조사기간 및 조사정점에서 실제 측정 COD 농도와 차를 자생 COD농도로 평가한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 여기서 이용된 동계 수질 자료는 춘계에 가까운 시기에 관측되었기 때문에 생물생산성이 떨어져서 외래성 COD의 영향만을 나타낸다고 볼 수 없다. 또한, 진해만의 경우 대부분의 연구 하계의 저층 빈산소수괴의 형성과 적조 발생에 관해 집중되어 있기 때문에 동계의 연속된 수질 자료의 확보가 어렵다.

이렇게 계산한 자생 COD는 -0.45~3.26 mg/L의 범위로 평균 1.29 mg/L 을 나타내었으며, Total COD에서 차지하는 비율은 -26.2~79.9%의 범위로 평균 42.1%이었다. 음수의 값은 하계에 비해 동계의 COD가 높게 관측된 견내량 인근 수역으로 만 외부에서 산소 소모성 물질의 일시적인 공급에 의한 것으로 사료된다. 공간적으로는 마산만 내측에서 가장 높은 값을 나타내었는데, 이 값은 하계 낙동강하구에서 30.6~46.2%로 계산된 것과 비교할 때 평균값에서 큰 차이가 없다.

#### 3.4.2. 생태계 모델을 이용한 자생 COD의 계산 생태계 모델을 통해 가능한 두 가지 방법에 따라

진해만의 자생 COD를 산정하였다(Table 5). COD<sub>load\_0</sub> 방법에 의해 계산된 자생 COD는 0.66~3.93 mg/L로, 평균 2.08 mg/L을 보였으며, 자생 COD가 관측 COD의 72.1%를, 계산 값에 대해서는 70.3%를 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 12).

COD<sub>difference</sub> 방법에 의해 계산된 자생 COD는 0.74~3.48 mg/L로, 평균 2.03 mg/L을 보였으며, 자생 COD가 관측 COD의 74.5%를, 계산 값에 대해서는 88.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 각각의 방법

에 의해 구해진 표층의 자생 COD 분포와 표층의 물리 확산 COD의 분포를 Fig. 13~Fig. 14에 나타내었다. 물리확산 COD는 마산만 내측보다 경계에서 오히려 높게 보이는데, 이것은 유속에 의해 낙동강하구 측 경계에서 이송되어 오는 양이 많음을 나타내며, 진해만으로의 유기물 부하가 가장 큰 덕동하수처리장은 저층에서 outfall 되기 때문에 표층에서는 영향이 크게 나타나지 않는다. 자생 COD의 분포는 유속이 큰 경계에서는 두 가지 방법에서 공히 매우 낮은 분포를 보였고, 부영양화도가 높은 마산만 내측과 행암만과 육상부하의 외부 유출통로인 거제도 북부해역 중앙역에서 매우 높게 나타났다. 각각의 방법에 의해 구해진 선형회귀식은 첫 번째 방법이 Total COD = 0.54 × Autochthonous COD + 1.60 (r=0.81) 이었으며, 두 번째 방법에서는 Total COD = 1.22 × Autochthonous COD + 0.24 (r=0.94) 였다(Fig. 13). 두 번째 방법이 관측 값에 대해 상관관계가 더 높았으나, 관측 값을 통해 계산한 ΔCOD 방법에 비해 전체 COD에 대한 비율이 더 크게 나타났다.

진해만의 자생 COD를 ΔCOD 방법에 따라 구하면, 신의 연구에서, 하계 낙동강 하구역 ΔCOD법을 통해 산정한 자생 COD의 비율인 약 40%와 유사하게 나타나는데 이는 수심이 얇고 해수의 유동이 빠른 낙동강 하구와 부영양화와 안정된 수계를 제공할 수 있는 진해만의 생물 생산력이 비슷한 수준이라는 다소 어색한 결과를 도출할 수 있기 때문에, 생태계 모델링에서 구한 방법에 더 신뢰성이 보장된다면, 매우 유용한 방법이 될 수도 있을 것이다. 따라서, 생태계 모델링에서 산출한 자생 COD 값의 정도를 뒷받침할 수 있는 실험 방법에 관한 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

이상의 결과에서 진해만의 수질관리를 위해서는 COD의 외부부하, 즉, 산소를 소모하는 유기물질인 하·폐수 등의 유기물질의 직접적인 유입을 통제하는 것도 중요하지만, 식물플랑크톤과 같이 COD가

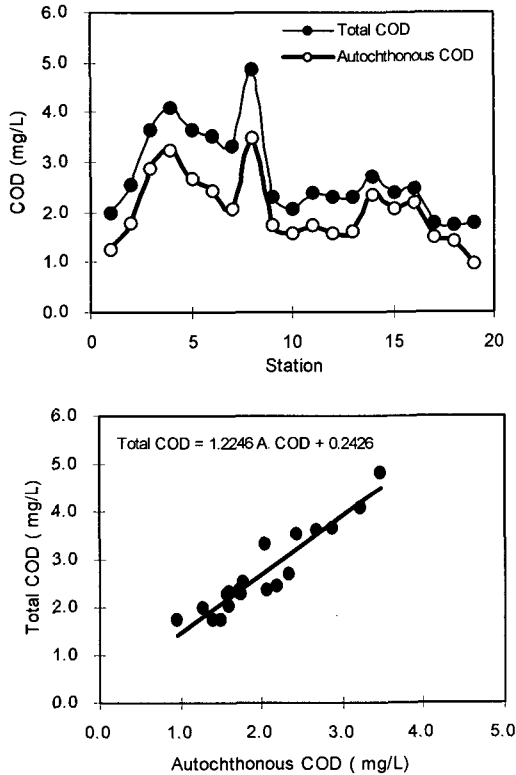


Fig. 13. Relationship of COD and autochthonous COD calculated by ecological modeling ΔCOD<sub>difference</sub> method.

Table 5. Comparison of autochthonous COD by each evaluation methods in Jinhae Bay, in Aug. 2003

	Observed		ΔCOD		COD <sub>load_0</sub>		COD <sub>difference</sub>			
	1) COD (mg/L)	2) Calculated COD (mg/L)	A. COD* (mg/L)	ratio to 1) (%)	A. COD (mg/L)	Ratio to 1) (%)	Ratio to 2) (%)	A. COD (mg/L)	Ratio to 1) (%)	Ratio to 2) (%)
Range	1.73 ~ 4.85	1.08 ~ 4.97	-0.45 ~ 3.26	-26.2 ~ 79.9	0.66 ~ 3.93	28.8 ~ 133.4	52.4 ~ 83.6	0.74 ~ 3.48	54.6 ~ 88.7	38.2 ~ 193.7
Avg.	2.73	2.79	1.29	42.1	2.08	72.1	70.3	2.03	74.5	88.9

\*A. COD = Autochthonous COD

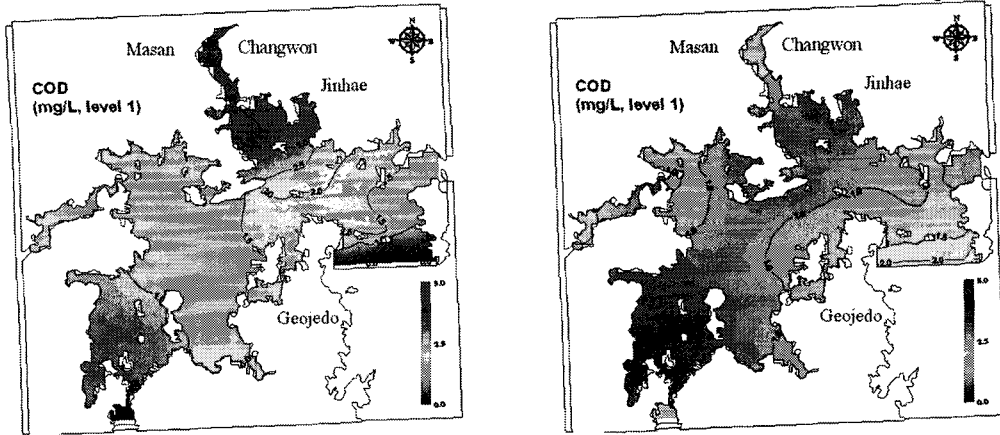


Fig. 14. Autochthonous COD(left) and Physical diffusion COD calculated by ecological modeling  $COD_{load,0}$  method.

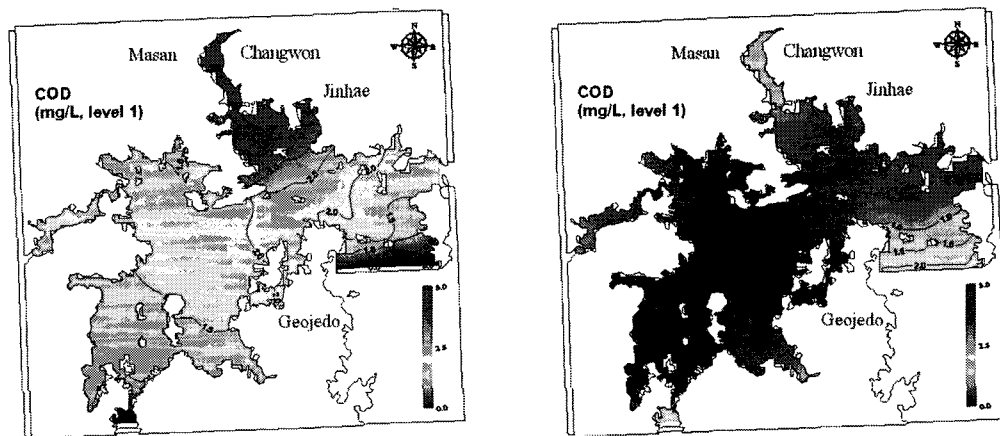


Fig. 15. Autochthonous COD(left) and Physical diffusion COD calculated by ecological modeling  $COD_{difference}$  method.

되는 입자물질의 성장을 제어하는 것이 더 효과적이라는 것을 의미한다. 이것은, 식물플랑크톤의 성장을 억제하여 진해만 중앙부~진동만~마산만에서 해마다 이어지는 적조를 제어하고, 이를 위해 육상유입원, 퇴적물 용출, 비점원 오염원 등에서의 영양염을 제어하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다. 또한, 해역에서의 자생COD는 공간적으로 큰 차이를 보이는데 (Fig. 14~Fig.15), 이에 대한 공간적 평가를 통한 각 내만 해역별 자생COD의 영향을 평가하는 것도 중요한 과제가 될 것이며, 차후에는 오염이 극심한 지역과 상대적으로 육상부하량이 적은 해역과의 자생COD의 양적인 비교하는 것도 흥미 있을 것이다.

#### 4. 결론

생태-유체역학 모델을 이용하여 진해만의 해수유동과 층별 COD 농도를 재현하였으며, 이를 바탕으로 진해만의 자생 COD를 계산하여 수질관리 방안

선택을 위한 기초자료로 제공하였다. 생태계 시뮬레이션 결과 계산치와 관측치의 상대오차가 표층에서 평균 27.97, 상관계수가 0.811, 결정계수가 0.657로 나타나 양호하게 재현된 것으로 판단된다.  $\Delta COD$  방법을 통해 산정할 경우 자생 COD는 전체 COD의 42.1%에 해당하는 것으로 나타났고, 두 가지 모델링 방법을 통해 계산할 경우 70% 이상을 차지하는 높은 비율로 나타났다. 자생 COD 평가 결과 공간적인 분포는 육상부하의 유입이 큰 마산만 부근에서 매우 높게 나타났다. 이상의 결과에 의하면, 진해만 COD의 제어는 육상에서 유입하는 유기물량에 치중하는 것보다는 생물작용에 의한 증가가 크게 기여하는 것으로 나타났으며, 식물플랑크톤의 대량 증식을 억제하는 방안으로 수질관리가 이루어져야 하겠고, 특히, 영양염의 제어가 필요하다고 판단되며, 이에 따른 조사 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장 환경용량산정연구, RP-2007-ME-014)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 김종구, 박청길, 김광수, 1994, 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용, 한국환경과학회지, 3(3), 185-195.
- 2) 김동명, 2005, 가막만의 COD 거동 및 분포 특성 평가를 위한 생태계 모델링, 한국환경과학회지, 14(9), 835-842.
- 3) 小倉紀雄, 1978, 内灣の有機物とその分解, 月刊海洋科學, 10(10), 807-812.
- 4) 신성교, 이수웅, 박청길, 1994, 낙동강에서 Chlorophyll-a와 BOD의 상관관계, 수질보전/한국물환경학회지, 12(4), 369-375.
- 5) Morioka T., 1980, Application of ecological dynamics for eutrophication control in Kobe Harbour area, Pro. Wat. Tech., 12, 445-458.
- 6) Nakanishi H., 1990, Inflowing pollution loads relating to eutrophication of water bodies and their control. Sci. Forum of the Seto Inland Sea., 1(3), 31-43.
- 7) Fallen R. D., Thomas D. B., 1979, Decomposition of Blue-Green Algae(cyano- bacterial) blooms in Lake Mentota, Wisconsin, Applied and Environ. Microbiology, 37(5), 820.
- 8) 신성교, 1996, 자생 BOD를 고려한 낙동강의 수질관리, 박사학위논문, 환경공학과, 부경대학교, 부산.
- 9) 김종구, 이지연, 2001, 금강수계의 수질관리를 위한 UQUAL2E 모델의 적용(I)-모델입력인자 산정 및 자생 BOD 평가, 한국환경과학회지, 10(2), 119-127.
- 10) 신성교, 박청길, 송교욱, 1995, 낙동강 하구해역의 자생 COD평가, 한국수산학회지, 28(3), 263-269.
- 11) 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 박사학위논문, 환경공학과, 부산수산대학교, 부산.
- 12) 김형철, 2007, 수질관리를 위하나 시화호의 환경용량 산정, 박사학위논문, 환경공학과, 부경대학교, 부산.
- 13) 엄기혁, 2007, 이때패의 생물정화기작을 이용한 마산만의 수질개선방안, 박사학위논문, 환경공학과, 부경대학교, 부산.
- 14) 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, 22(2), 96-108.
- 15) Kremer J., Nixon S., 1978, A coastal marine ecosystem: Simulation and analysis, Springer-Verlag, 16pp.
- 16) Nakata, T. K., 1991, A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay, KAIKOU5-2, 1-26.
- 17) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 27(4), 414-433.
- 18) 김종구, 박청길, 신성교, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화(富營養化) 모델링(I) - 생태계 모델을 이용한 식물플랑크톤 농도 분포 시뮬레이션, 한국해양환경공학회지 17(2), 121-135.
- 19) Nakata K., Horiguchi F., Taguchi K., Setoguchi, Y., 1983a, Three dimensional tidal current simulation in Oppa Bay, Bulletin of the National Research Institute Pollution Resource, 12, 17-36.
- 20) Nakata K., Ishikawa K., Matukawa Y., 1985, Numerical models of coastal current and transport in the bay, Bulletin on Coastal Oceanography, 22, 96-108.
- 21) 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, 17-36.
- 22) 柳哲雄, 1989, 海の中デものはど動くか, 沿岸海洋學, 136pp.
- 23) 柳哲雄, 1993, 海況モデル, 沿岸海洋研究ノート, 30(2), 187-195.
- 24) 堀江 毅 · 細川恭史, 1983, 海流におけるモデルの物質循環數値水質支配要因について, 港灣技術研究所報告, 22(3), 3-15.
- 25) 김광수, 최영찬, 2000, 생태계 모델을 이용한 제주도 남부연안해역의 환경용량 산정, 한국해양환경공학회지, 3(1), 52-61.
- 26) 堀江 毅, 1990, 海域の水質・生態系の數値モデル, 土木學會論文集, 417(II-13), 21-23.
- 27) 최우정, 1993, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션, 박사학위논문, 환경공학과, 부산수산대학교, 부산.
- 28) 장선덕, 1987, 연안해역 오염물질의 이동과 분산. 적조현상과 어장보전, 71pp.

- 29) 김광수, 1995, 생태계모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, 박사학위논문, 환경공학과, 부산수산대학교, 부산.
- 30) 김동명, 1999, 생태계 모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 박사학위논문, 환경공학과, 부산수산대학교, 부산.
- 31) 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 가막만의 환경용량 산정(Ⅱ) - 굴양식장 환경용량 산정, 한국수산학회지, 29(5), 709-715.
- 32) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 27(4), 413-433.
- 33) Okaichi T., 1985, The Cause of red-tide in Neritic Waters, Japan Fisheries Resources Conversation Association, 58-75.