

생태계 모델을 이용한 진해만의 COD의 거동과 분포특성 평가

홍 석 진 · 이 원 찬 · 정 래 홍 · 박 성 은 · 장 주 형 · 김 형 철 · 김 동 명**
국립수산과학원 환경연구팀, *국립수산과학원 서해수산연구소, **부경대학교 생태공학과
(2007년 4월 17일 접수; 2007년 11월 22일 채택)

Estimation of a Transport and Distribution of COD using Eco-hydrodynamic Model in Jinhae Bay

Sok Jin Hong, Won Chan Lee, Rae Hong Jung, Sung Eun Park,
Ju Hyung Jang, Hyung Chul Kim* and Dong Myung Kim**

Environmental Research Team, National Fisheries R & D Institute, Busan 619-705, Korea
*West Sea Fisheries Research Institute, Incheon 400-420, Korea

**Division of Environmental System, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
(Manuscript received 17 April, 2007; accepted 22 November, 2007)

To find proper water quality management strategy for oxygen consumption organic matters in Jinhae bay, the physical process and net supply/decomposition in terms of COD was estimated by three-dimensional eco-hydrodynamic modeling. The estimation results of physical process in terms of COD showed that transportation of COD was dominant in loading area from land to sea, while accumulation of COD was dominant in middle~bottom level. In case of surface level, the net supply rate of COD was 0~60 mg/m²/day. The net decomposition rate of COD was 0~-0.05 mg/m²/day(-5~-10 m, in depth) to 2 level, and -0.05~-0.20 mg/m²/day(10 m ~) to bottom level. These results indicate that the biological decomposition and physical accumulation of COD are occurred for the most part of Jinhae Bay bottom. The variation of net supply or net decomposition rate of COD as reducing land based input loading is also remarkable. Therefore, it is important to consider both allochthonous and autochthonous oxygen demanding organic matters to improve the water quality of Jinhae Bay.

Key Words : Ecological model, COD distribution, Transport, Accumulation, Net supply, Net decomposition, Jinhae Bay

1. 서 론

화학적 산소요구량(COD)은 해역의 수질기준을 평가하는 환경지표로 육상에서 유입되어 용존산소를 소모하는 유기물 등과 수역자체에서 생산된 자생유기물의 양을 간접적으로 나타낼 수 있어 해역의 수질관리를 위해 유용하게 이용되고 있는 환경인자이다.

연안해역 생태계의 물질순환 과정은 육상에서 무기·용존성 형태로 유입된 질소와 인이 광합성에 의

해 식물플랑크톤의 생체로 흡수되어 유기물입자가 된다. 식물플랑크톤은 다시 동물플랑크톤의 먹이로 이용되며 먹이연쇄과정을 통하여 고차소비자의 에너지원이 되고 이들 포식자의 자연사망 또는 배설물의 형태로 배출된 후 다시 무기·용존성 형태로 돌아간다. 이러한 물질순환은 해역의 자정능력 범위에서 물질생성과 소멸이 평형을 이룰 경우 쾌적한 해양환경을 유지하지만, 해수교환이 원활하지 않고 육상기인 오염부하량이 증가하는 수역에서는 부영양화가 진행되어 해양환경과 생태계 건강도를 악화시키는 문제를 발생시킬 수 있다. 이와 같은 이유로 용존성과 입자물의 형태를 반복하는 비보존성 물질의 이동 기구를 밝히기 위해서는 물질이동 기초방정식에 무기·

Corresponding Author : Sok Jin Hong, Environmental Research Team, National Fisheries R&D Institute, Busan 619-705, Korea
Phone: +82-51-720-2252
E-mail: sj@momaf.go.kr

용존태의 입자유기물화, 입자물질 침강, 입자유기물의 무기·용존화는 물론 물질의 이류·분산과정을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

진해만은 반폐쇄성 내만으로 많은 양식시설이 있으며, 인근에는 도시와 공단이 발달하여 도시하수와 산업폐수에 의해 수질오염이 심할 뿐만 아니라 매년 수온이 상승할 때마다 적조가 발생하고, 저층의 빈산소화로 인해 저서 환경이 악화되고 있으며, 진해만 환경개선을 목적으로 물리, 화학 및 생물 등 전반적인 분야에서 많은 연구가 진행되어 왔다¹⁾. 진해만의 수질오염 관련 연구로는 진해만 적조현상 및 특성에 관한 연구²⁾를 비롯해 진해만 해수의 부영양화에 관한 연구³⁾, 진해만 영양염과 클로로필 농도의 일주변화⁴⁾, 진해만에 있어서의 COD의 시공간적인 특성 및 결정인자에 관한 연구⁵⁾ 등 많은 연구가 수행되었다. 특히 생태계에 대한 총괄적인 접근을 위해서는 해역 내에서 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 질소 및 인의 순환을 포함한 생태학적 관련인자의 관계를 밝히는 생태계 모델이 수질관리를 위한 도구로 사용되어 왔다⁶⁻⁸⁾. 그러나, COD가 해역의 어느 지역에서 축적 또는 희석, 확산 될 가능성이 높은지에 관한 연구와 생물, 화학적인 공급과 분해에 따른 COD의 증가율이나 감소율에 대한 만내 분포에 관한 연구는 드문 실정이다. 이러한 오염물질의 거동 및 분포에 관한 연구 결과는 육상 오염원의 해양 배출지역 선정이나 양식장의 위치 선정 등에도 참고할 수 있으며, 이를 위해서는 생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)이 유용한 수단이 될 수 있다.

본 연구에서는 진해만의 COD 거동 및 분포특성을 파악하기 위하여 생태-유체역학 모델을 적용하였다. 시뮬레이션 결과의 COD 현존량이 결정되기까지의 과정 중 이류와 확산작용에 의한 물리과정량을 산정하여 만내의 어떤 지역에서 COD 축적현상이 일어나는지를 파악하며, 지역적 분포에 따른 순 증가율 또는 순 감소율을 산정하여, 수질관리 방안의 기초 자료로 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 생태계 모델링

본 연구에서는 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층 모델과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델로 구성되어 있는데, 해양물리 모델은 中田 등⁹⁾에 의해 개발 적용되어진 다층모델이며 생태계 모델은 Kremer와 Nixon¹⁰⁾에 의해 개발, 적용된 모델의 지배방정식을 바탕으로 Nakata와 Taguchi¹¹⁾에 의해 grid 모델 형태로 구성된 모델을 사용하였다. 이 모델링 시스템은 최 등¹²⁾과 김 등¹³⁾에 의하여 국내 연안환경에 적합하

도록 연구 개량되어 그 적용성이 검토되었으며, 진해만과 마산만 해역에서 기초생산생태계와 환경용량산정에 주로 이용되어 왔다.

해역의 입의 지점에 있어 수질을 구성하는 요소 현존량(B)의 시간에 따른 농도변화는 다음과 같은 물질수지방정식으로 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right] \\ & + \frac{dB}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x, y, z는 좌표변수, u, v, w는 x, y, z방향의 유속성분, Kx, Ky, Kz는 x, y, z방향의 와동확산계수를 나타내며, B는 수질구성요소의 현존량(또는 농도), t는 시간, dB/dt는 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 구성요소의 변화량을 나타낸다. 식 (1)에서 물리과정량 부분을 제외하면 생물·화학적 과정 부분에 관하여 나타낼 수 있다. 식물플랑크톤 구성요소의 경우 수역 내에 분포하는 여러 종을 대상으로 환경요인에 따른 중간 경쟁 및 천이 등 생태학적 반응과 효과를 해석해야 하지만, 본 연구에서는 상기 반응과 효과의 해양 생태적 지수/지표의 불확실성과, 이로 인한 모델의 안정성 저감을 배제하기 위해, 가능한 한 우점종에 한하여 단일종 군집의 효과만을 고려하였다. 식물플랑크톤 생물량, P(mgC/m³)의 시간에 따른 농도변화는 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} = & \text{photosynthetic growth} - \text{extracellular release} \\ & - \text{natural mortality} - \text{grazing by zooplankton} \\ & - \text{sinking} \end{aligned} \quad (2)$$

식물플랑크톤 구성요소와 같이 평균적인 단일 동물플랑크톤 군집을 대상으로 하여 동물플랑크톤 생물량(Z)의 시간에 따른 변화를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{dt} = & \text{grazing-excretion-natural mortality} \\ & \pm \text{vertical migration} \end{aligned} \quad (3)$$

본 모델에서 현탁유기물 구성요소는 비생물성 입자상 유기물(detritus)을 의미하며, 탄소량 단위(mg C/m³)로 표현하여 시간변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dPOC}{dt} = & \text{natural mortality of phytoplankton} \\ & + \text{excretion of zooplankton} + \text{natural} \\ & \text{mortality of zooplankton} + \text{input from out of} \\ & \text{the system} - \text{microbial decomposition of} \\ & \text{POM} - \text{sinking} \end{aligned} \quad (4)$$

용존유기물(DOM) 구성요소는 탄소량 단위의 DOC로 표현되며 용존유기인(DOP) 및 용존유기질소(DON)는 C/P, C/N 조성비를 이용해서 환산하는데, DOC의 시간변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dDOC}{dt} = & \text{extracellular release} + \text{microbial} \\ & \text{decomposition of POM} - \text{microbial} \\ & \text{decomposition of DOM} + \text{input from out} \\ & \text{of the system} \end{aligned} \quad (5)$$

COD는 수중의 분해하기 쉬운 유기물의 존재량을 나타내는 지표로, 생물로서는 식물 및 동물플랑크톤, 비생물로는 현탁유기물이나 용존유기물의 4가지 유기물 compartment의 거동을 알면, COD의 시간변화를 알 수 있다. 따라서 위에서 설명한 각 생물과정의 수식화를 통해서 해역내의 각 형태의 유기물에 대한 단위시

간당의 증감량이 구해진다. 즉, $(\frac{\partial P}{\partial t})^*$, $(\frac{\partial Z}{\partial t})^*$, $(\frac{\partial POC}{\partial t})^*$, $(\frac{\partial DOC}{\partial t})^*$ 가 유기물 변화량을 나타낸다.^{6~7,10~13)}

이들은 탄소량으로 나타낸 변화량이지만, 용존산소(DO)로 환산하는 것과 같은 방법으로 이 탄소량을 COD농도로 환산하는 계수를 곱함으로써 COD의 변화량, 즉, 내부생산량을 평가할 수 있다. 이 환산계수를 각각 [COD:C_p], [COD:C_z], [COD:C_{POM}], [COD:C_{DOM}]이라고 하면 내부생산량은 다음의 수식화로 표현된다.

$$\begin{aligned} (\frac{\partial COD}{\partial t}) = & [COD:C_p] \cdot (\frac{\partial P}{\partial t}) + [COD:C_z] \cdot (\frac{\partial Z}{\partial t}) \\ & + [COD:C_{POM}] \cdot (\frac{\partial POC}{\partial t}) + [COD:C_{DOM}] \cdot \\ & (\frac{\partial DOC}{\partial t}) \end{aligned} \quad (6)$$

이들의 환산비를 어떻게 결정할 것인지가 문제이지만, 이 모델에서는 총산소요구량(TOD) : COD ≃ 2.26 : 1의 관계¹⁸⁾를 사용하여 TOD로부터 COD를 환산한다. 또한, 이 모델에서는 계외로부터의 COD 유입부하량을 q_{COD} 로 나타내어 현탁 또는 용존유기물

의 유입부하량 즉, q_{POC} 와 q_{DOC} 사이에는 다음의 관계가 성립되는 것으로 나타내었다.

$$q_{COD} = [COD : C_{POM}] \cdot q_{POC} + [COD : C_{DOM}] \cdot q_{DOC} \quad (7)$$

식 (1)에서 생물 화학적인 과정을 포함하는 항을 제외한 부분은 이류와 확산에 의해서 대상물질이 물리적으로 이송 확산되는 현상을 표현하며, 이를 대상물질의 물리과정량이라 한다. 모델 내 각 cell에서 이 부분의 합이 0보다 크면 이류와 확산에 의한 대상물질의 유입량이 유출량보다 많음을 나타내며, 0보다 작으면 유출량이 유입량보다 많음을 나타낸다. 즉 물리과정량이 0보다 큰 cell에서는 각 구성요소의 축적 현상이 일어날 가능성이 큼을 나타내고, 0보다 작은 부분에서는 인접 cell로 이송, 확산될 가능성이 높음을 나타낸다.

그리고, 식 (1)에서 물리과정량 부분을 제외하면, 생물·화학적 과정부분에 관하여 나타낼 수 있다. 모델 내 각 cell에서 COD의 생물·화학적 변화는 식물 플랑크톤 및 동물 플랑크톤, 현탁유기물, 용존유기물의 함수이며 식 (6)과 같아진다. 생태계 모델내의 식물 플랑크톤과 동물 플랑크톤, 현탁유기물, 용존유기물에 대한 생물·화학적 반응식은 각각 식 (2)~(5)에 나타낸 바와 같이 COD 농도를 증가시키는 향으로는 식물 플랑크톤의 광합성 및 동물플랑크톤의 섭식, 계 외로부터의 공급 등이 있으며, 감소시키는 향으로는 식물 플랑크톤의 침강 및 호흡, 현탁유기물의 침강, 용존 유기물의 무기화 등이 있다. 그 이외의 식물플랑크톤의 분비 및 사멸, 동물플랑크톤의 배설 및 사멸, 현탁유기물의 분해 등은 조건에 따라 공급 또는 감소의 향이 된다. 이를 바탕으로 하여 각 cell에서의 COD의 생물·화학적 공급에 의한 증가향과 분해에 의한 감소향의 차를 구하여 COD의 순증가 또는 순감소를 계산하였다. 즉, 이 값이 양의 값을 가지는 지역은 COD의 공급이 탁월하여 순증가가 일어나는 지역을 나타내며, 음의 값을 가지는 지역은 유기물의 분해현상이 탁월하여 순 감소가 일어나는 지역을 나타낸다.

2.2. 대상해역 및 입력자료

본 연구의 모델 영역과 초기치와 경계치 및 생태계 모델 파라메타의 계수 값들은 기존의 연구¹⁴⁾에서 수행되었던 생태-유체역학 모델의 자료를 적용하였는데, COD 농도는 초기값과 경계값을 2.0~2.5 mg/L, 용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)은 각각 10.0 μg-at/L, 2.0 μg-at/L의 값을 사용하였다. 식물 플랑크톤과 동물 플랑크톤은 각각 층별, 위치별로 200~500 mgC/m³의 값을 입력하였다(Table 1).

육상기인 오염부하량은 진해만으로 유입되는 하천

Table 1. Input data for an ecosystem model

Parameters		Input values							
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 500$ m							
Water depth		chart datum + MSL*							
Time interval		600 sec							
Initial condition for compartments									
Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	mg/L	mg/L	$\mu\text{g-at/L}$	$\mu\text{g-at/L}$	mgC/m^3	mgC/m^3	mgC/m^3	mgC/m^3	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	mg/L	$\mu\text{g-at/L}$	$\mu\text{g-at/L}$	mgC/m^3	mgC/m^3	mgC/m^3	mgC/m^3	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		3.0×10^5 cm^2/s							
Horizontal diffusion coefficient		3.0×10^5 cm^2/s							
Vertical diffusion coefficient		Level 1 : 1.0 cm^2/s Level 2~Level 5 : 0.01 cm^2/s							
Calculation time		200 tidal cycles							

* : NORI marine chart No. 206, No. 204(NORI, 2004)

중 본 연구에서 조사된 17개 하천을 통해 유입하는 오염부하량 자료 중 2003년 하계(8월)를 기초로 하였다(Fig. 1). 하천 유량(Table 2)은 진천천이 전체 유입 하천 유량의 17.53 % 인 약 46 만 톤으로 가장 크게 나타났으며, 두 번째로는 덕동하수처리장의 방류 유량이 전체 유입하천 유량의 11.51%인 30 만 톤이 유입되고 있다. COD 부하량은 총 18.77 ton/day이었다.

많은 국내 해양생태계 모델연구의 결과¹⁵⁻¹⁹⁾에서는 0°C를 기준으로 하는 함수들이 많은데, 이는 Eppley²⁰⁾와 Thomann 등²¹⁾의 연구가 0°C를 기준으로 하는 것을 참고하고 있는 것으로 본 연구에서(Table 3)도 생물 관련 parameter는 0°C기준 온도의 함수로 표현하였다. 식물플랑크톤의 농도에 가장 큰 영향을 주는 식물플랑크톤의 최대 증식속도(μ_1)는 DiToro 등²²⁾의 2.16 /day 그리고, Collins²³⁾의 0.2~2.1 /day의 값을 참고하여 1.575 /day의 값을 적용하였다. 식물플랑크톤 사멸속도(μ_2)는 온도의 함수로 고려하

는 것이 일반적이거나, 현장 관측실험을 통한 자료가 없을 경우 계수로 활용함에 있어 불확실성이 증가할 수 있는데, 사멸속도에 관한 연구자료 중 Thomann 등²¹⁾은 0.02 /day, Jørgensen 등¹⁹⁾은 0.01~0.1 /day로 제시하고 있는데, 본 연구에서는 식물플랑크톤의 사멸속도로 0.0155 /day를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 생태-유체역학 모델

해수유동 모델과 생태계 모델의 결과가 실제 진해만의 수질을 잘 재현하는지는 홍 등²⁴⁾의 연구에 나타난 바와 같다. 표층 COD의 상대오차는 평균 27.97 %였으며, 전 비교 정점에서 비교적 양호하게 나타났으며, 상관계수(correlation coefficient) r은 표층 COD의 경우는 0.811, 결정계수(coefficient of determination) r^2 은 0.657로 나타났다. 이것은 계산치와 실측치가 높은 상관성을 가지며 적합하게 재현된 것을 말해준다.

생태계 모델을 이용한 진해만의 COD의 거동과 분포특성 평가

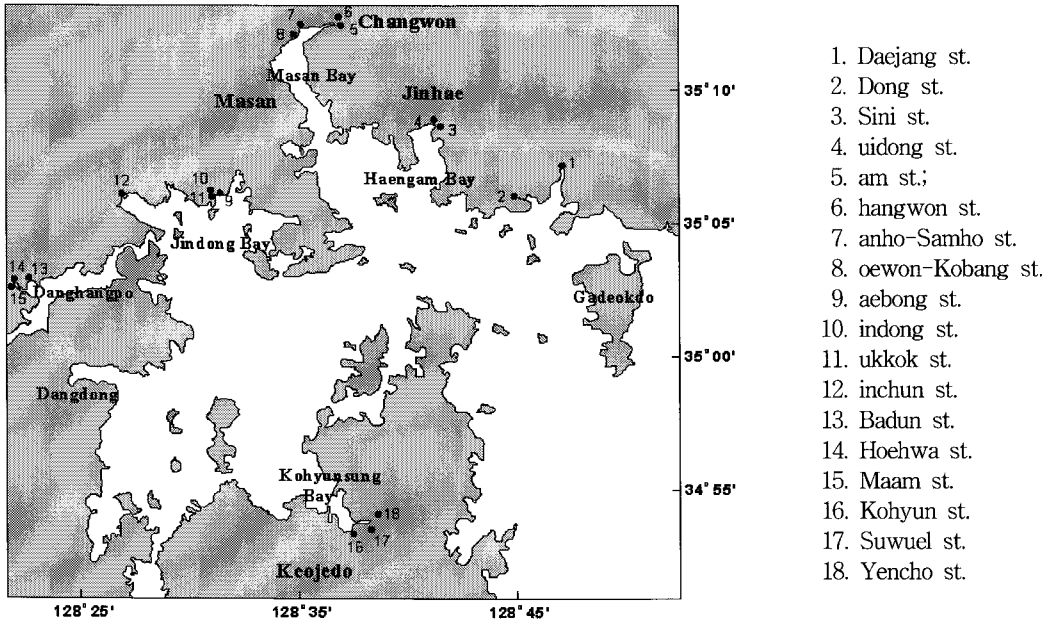


Fig. 1. Sampling station of land based pollution load.

Table 2. Input load data(Aug, 2003) for an ecosystem model

Station	Flow rate ton/day	DO ton/day	COD ton/day	PO4 kg/day	DIN kg/day	POC kg/day	DOC kg/day
Daejang st.	63963.7	0.46	0.17	0.00	0.17	19.37	260.72
Dong st.	28080.0	0.13	0.16	0.10	0.18	59.96	94.52
Sini st.	47654.8	0.31	0.23	0.15	0.45	34.48	149.87
Guidong st.	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nam st.	226464.3	1.58	1.17	0.67	2.07	141.91	602.40
Changwon st.	95060.7	0.35	0.92	1.19	1.69	82.59	388.23
Sanho-Samho st.	24779.5	0.17	0.18	0.18	0.36	21.03	88.81
Hoewon-Kobang st.	66809.8	0.59	0.65	0.65	1.24	50.28	270.18
Taebong st.	151054.8	1.29	0.49	0.06	0.74	55.16	389.42
Jindong st.	154615.2	1.42	0.48	0.14	1.25	25.42	331.65
Dukkok st.	79380.0	0.70	0.26	0.09	0.56	12.47	176.94
Jinchun st.	459766.4	4.34	1.64	0.10	2.85	109.07	1762.28
Badun st.	65710.7	0.65	0.27	0.05	0.47	15.90	159.61
Hoehwa st.	163337.5	1.26	0.69	0.16	1.16	52.23	333.86
Maam st.	127541.5	1.14	0.35	0.02	0.87	81.24	246.79
Kohyun st.	150583.1	0.89	0.45	0.12	0.92	23.65	265.18
Suwuel st.	87041.1	0.73	0.39	0.02	0.33	75.79	177.22
Yencho st.	271245.1	2.31	1.17	0.02	1.16	90.92	456.78
Jinhae WWTP	57616.6	1.00	0.45	58.20	729.04	1990.63	372.74
Dukdong WWTP	301930.0	1.00	8.67	625.00	10670.81	10107.97	2242.52

3.2. COD의 물리과정량

생태계 모델을 이용한 COD의 층별 물리과정량 계산결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이류 및 확산에 의한 COD의 유입량이 유출량보다 많아 축적현상이 일어

나는 지역은 어두운 색으로 표시하였으며, 유출량이 유입량보다 많아 cell의 이송현상이 나타나는 지역은 흰색으로 표시하였다. 2층~5층에 이르기까지 수심이 알아지는 곳이 나타나는데 이러한 영역은 점선영역

Table 3. The biological parameters used in the ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit	Used values
1	a_1	maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.55
2	a_2	respiration rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.10
3	a_3	maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.18
4	a_4	death rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.01
5	a_5	natural death rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.054
6	a_6	mineralization rate of POC at 0°C	day ⁻¹	0.012
7	a_7	mineralization rate of DOC at 0°C	day ⁻¹	0.005
8	a_8	oxygen consumption rate of sediment at 0°C	day ⁻¹	1.000
9	K_{SP}	half saturation constant for uptake of $PO_4^{3-}-P$ at 0°C	$\mu g-at/L$	0.30
10	K_{SN}	half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	$\mu g-at/L$	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 ⁻¹	0.57
14	P^*	function of grazing	mg C/m ³	75
15	μ	digestion efficiency of zooplankton	%	70
16	λ	total growth efficiency of zooplankton	%	30
17	κ	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 _P]	ratio of COD/C for phytoplankton	-	3.41E-04
23	[COD:C _Z]	ratio of COD/C for zooplankton	-	1.51E-03
24	[COD:C _{POM}]	ratio of COD/C for detritus(POC)	-	1.33E-03
25	[COD:C _{DOM}]	ratio of COD/C for DOC	-	1.12E-03
26	K_a	reaeration coefficient at sea surface	day ⁻¹	0.15

으로 나타내었다.

1층에서 COD 물리과정량이 양의 값을 나타내어 축적현상이 주로 일어나는 지역은 마산만 남쪽과 만 중앙부~거제도 양단간의 넓은 지역이었으며, 이송현상이 주를 이루는 지역은 마산만 내측과 행암만, 진동만 부근이었다.

또한, 3층에서는 덕동하수처리장 outfall의 방류구 부근에서 이송이 있으며, 그 상부에서는 축적이 일어나, 저층에서 상층으로의 COD 이송이 나타나고 있음을 알 수 있다.

이 지역을 제외한 나머지는 2층~저층까지는 경우는 만의 대부분의 지역에서 유입량이 유출량보다 큰 것으로 나타나 축적현상이 우세한 것으로 평가되었다.

전반적으로 진해만에서의 COD의 물리과정량은, 이송에 비해 축적이 우세한데, 이것은 표층은 주로 이송이 탁월하며, 중층~저층에서는 축적현상으로 명확히 구분이 되는 가막만의 경우와는 다소 차이가 있는 것으로 보인다²⁵⁾. 또한, 진해만 물리과정량의 특징

은 이송원 부근에서, 멀리 떨어지지 않은 곳에서 축적이 바로 이루어지고 있는 것으로 보여지며, 표층에서 저층으로의 이송도 크게 발생하는 것으로 보여서, 저층에서의 빈산소화 등의 저서 환경 악화를 유발할 수 있는 물리과정이 우세하다고 말할 수 있다.

3.3. COD의 생물과정량(공급 및 분해)

식 (6)에 의하여 생태계 모델 내 각 cell에서 계산된 COD의 생물화학적 공급량 및 감소량의 차를 구하여 계산한 층별 COD의 순증가율 또는 순감소율의 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

양의 값을 가지는 지역은 COD의 공급이 탁월한 순증가가, 음의 값을 가지는 지역은 유기물 분해가 탁월하여 순감소가 일어나는 지역을 표현하며, 물리과정량과 마찬가지로 2층~저층의 수심이 낮은 지역은 점선영역으로 나타내었다.

COD의 순증가율의 크기는 거제도 서안을 제외한 대부분의 해역에서 0.10 mg/m²/day 이상의 값을 보였으며, 마산항 내측으로 갈수록 커져서, 행암만 이북의

생태계 모델을 이용한 진해만의 COD의 거동과 분포특성 평가

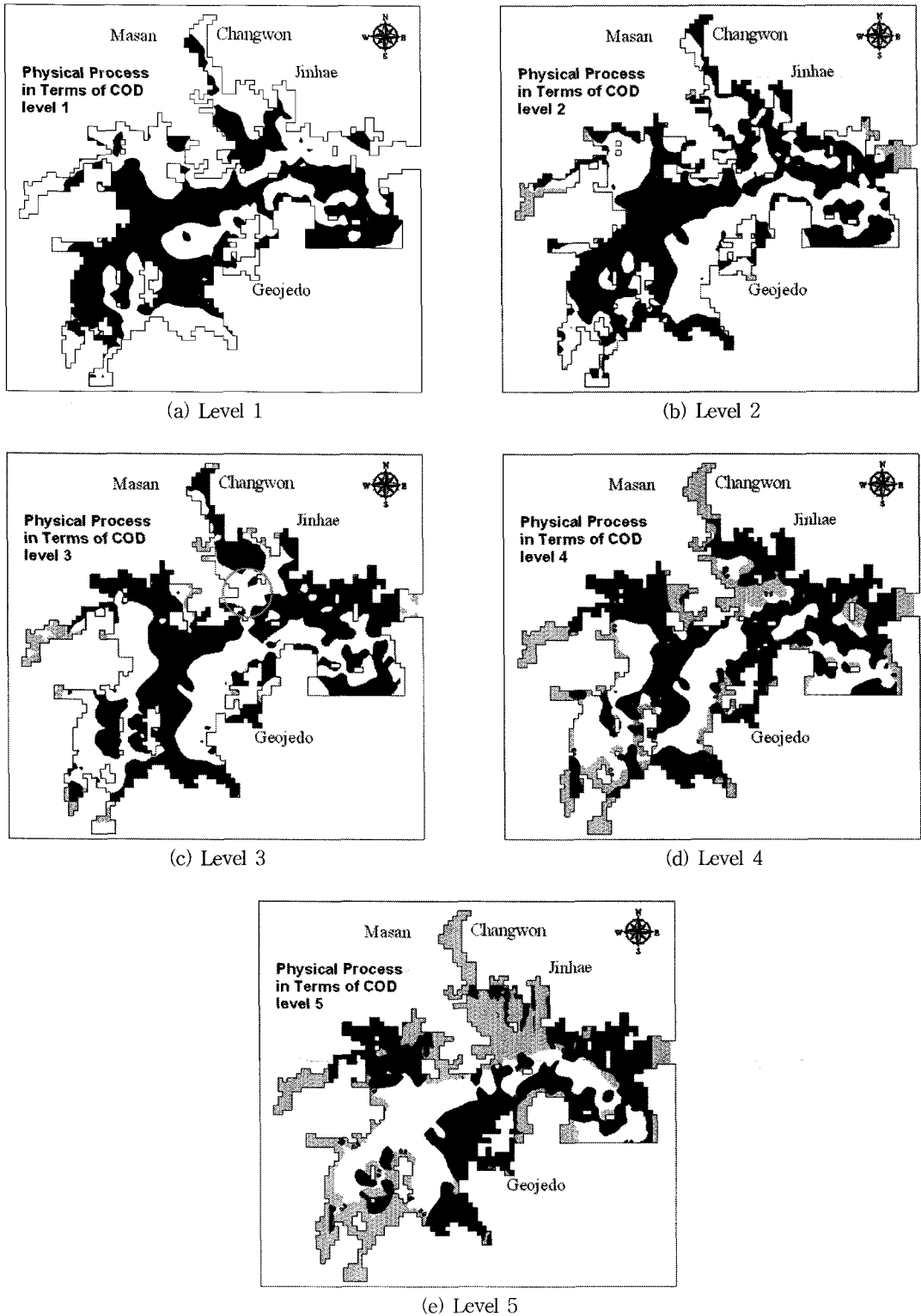
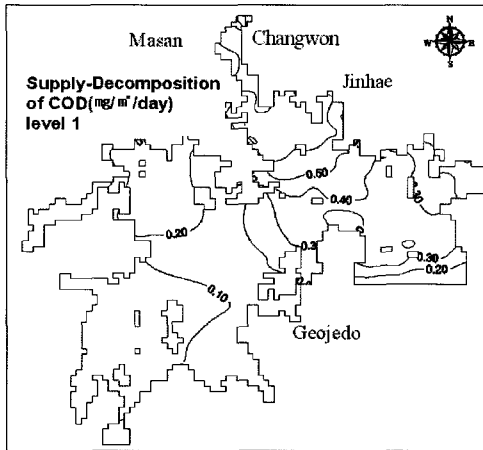
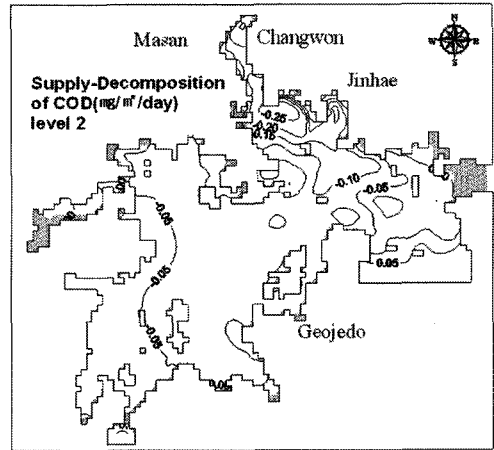


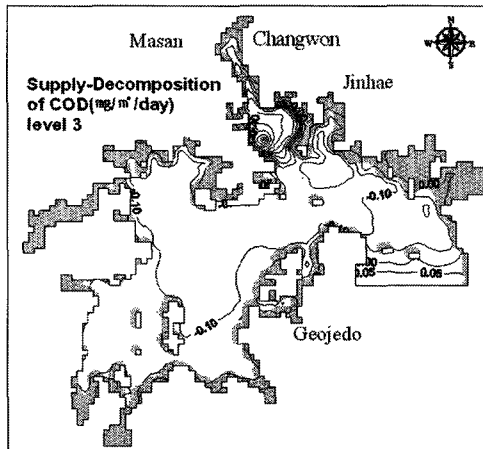
Fig. 2. Distribution of the simulated physical process in terms of COD at each level in the model area(Filled area, accumulation; blanked, transport; dotted, sediment).



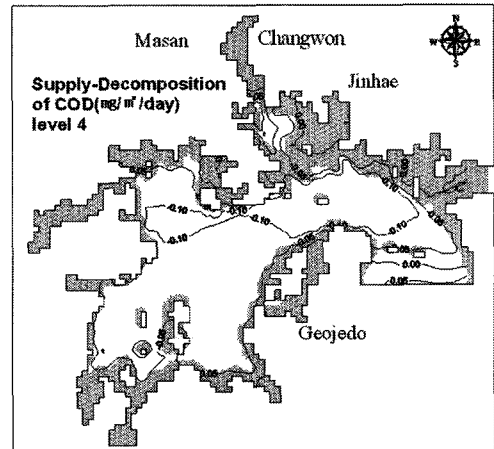
(a) Level 1



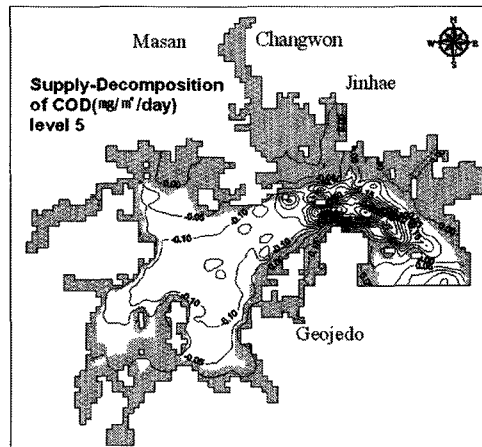
(b) Level 2



(c) Level 3



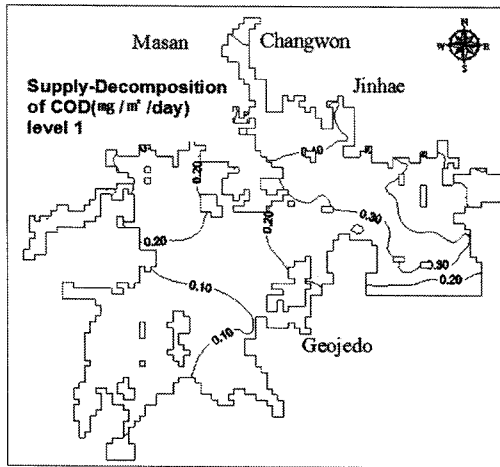
(d) Level 4



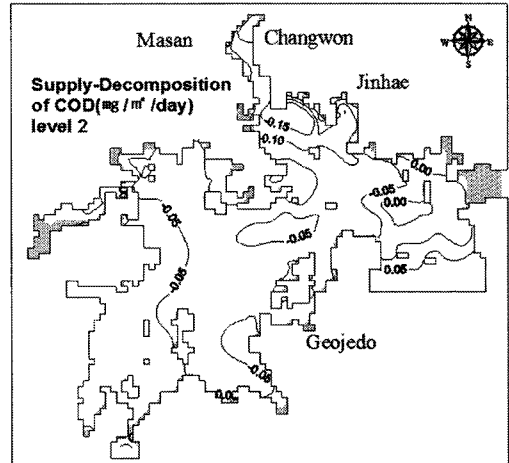
(e) Level 5

Fig. 3. Distribution of the simulated rate of the supply and decomposition of COD at each level in the model area(-, net decomposition; +, net supply; dotted, sediment).

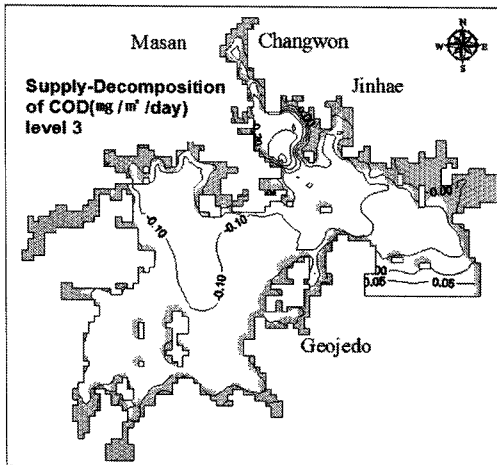
생태계 모델을 이용한 진해만의 COD의 거동과 분포특성 평가



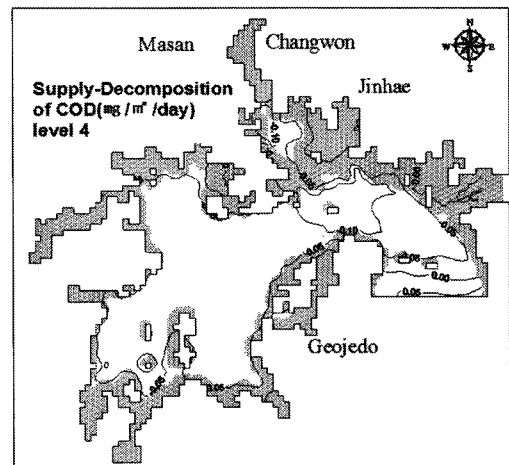
(a) Level 1



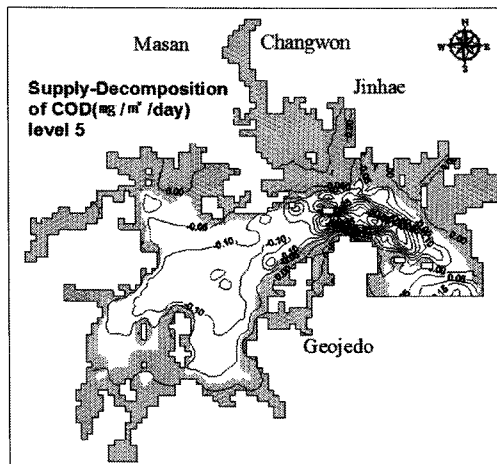
(b) Level 2



(c) Level 3

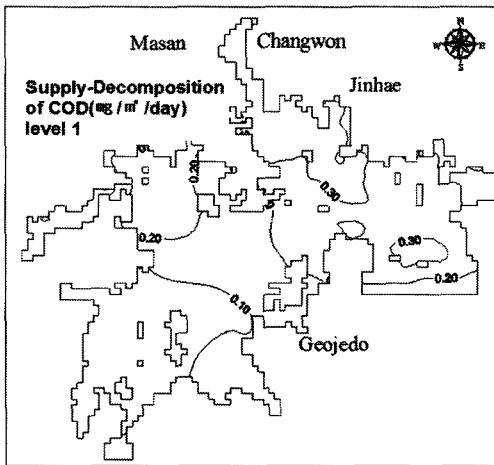


(d) Level 4

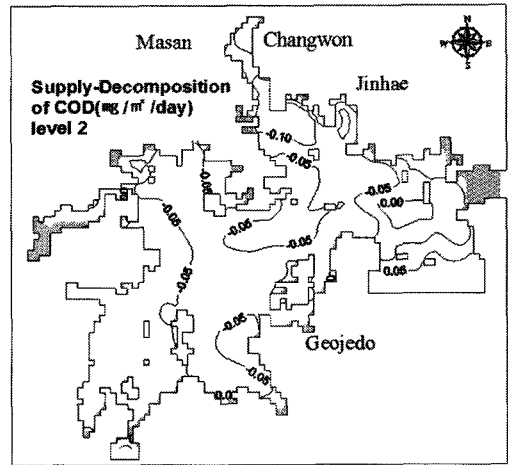


(e) Level 5

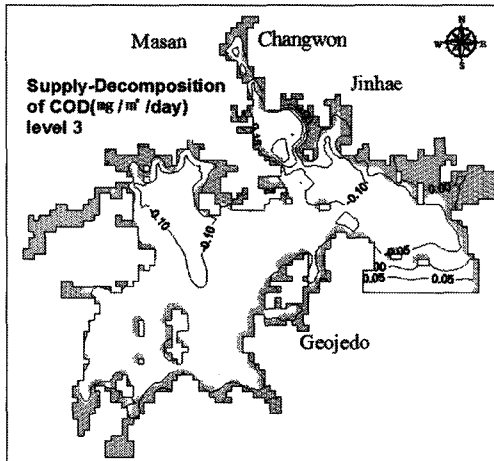
Fig. 4. Distribution of the simulated rate of the supply and decomposition of COD in 50% reduction of land based input loading at each level in the model area(-, net decomposition; +, net supply; dotted, sediment).



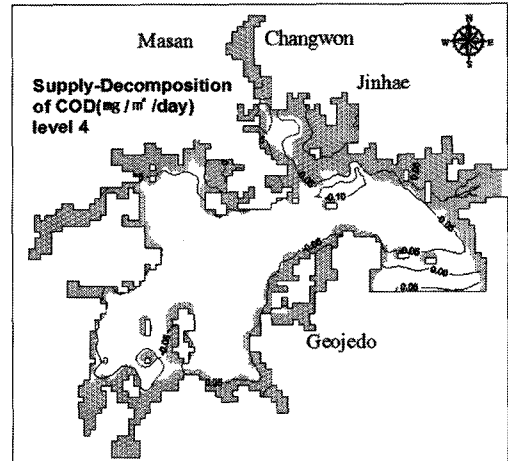
(a) Level 1



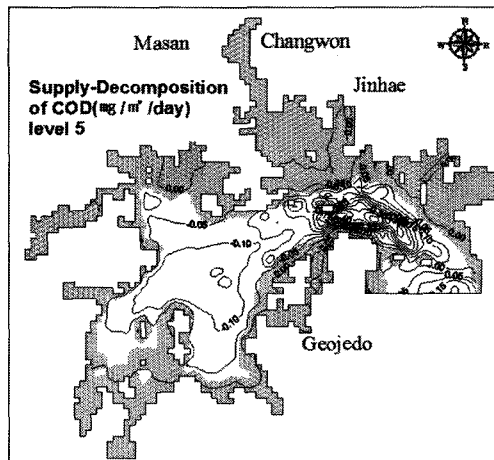
(b) Level 2



(c) Level 3



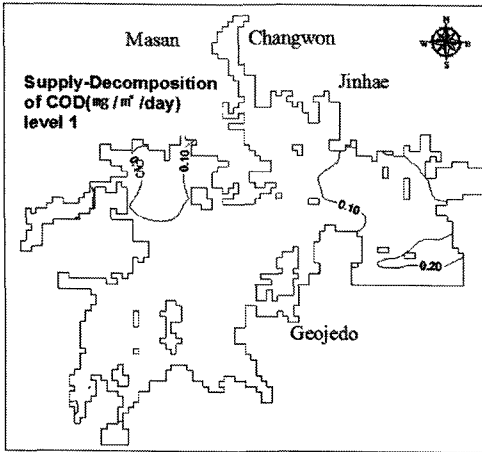
(d) Level 4



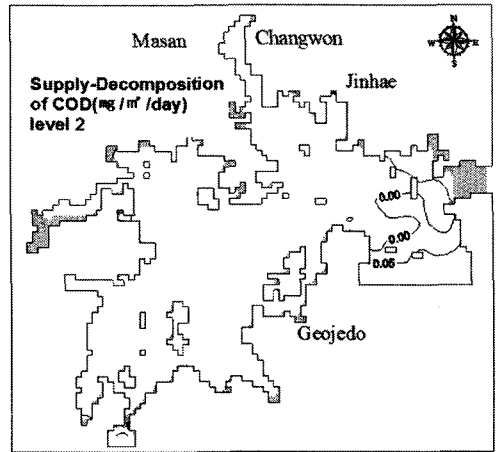
(e) Level 5

Fig. 5. Distribution of the simulated rate of the supply and decomposition of COD in 70% reduction of land based input loading at each level in the model area(-, net decomposition; +, net supply; dotted, sediment).

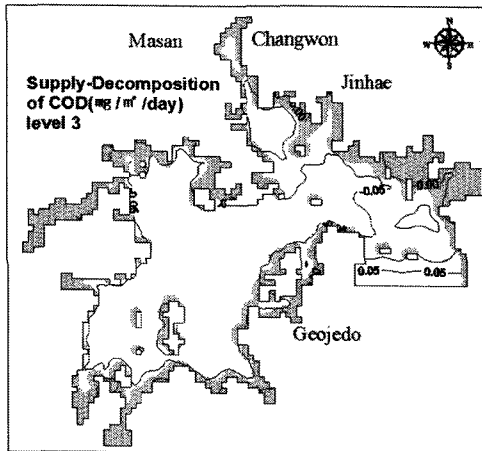
생태계 모델을 이용한 진해만의 COD의 거동과 분포특성 평가



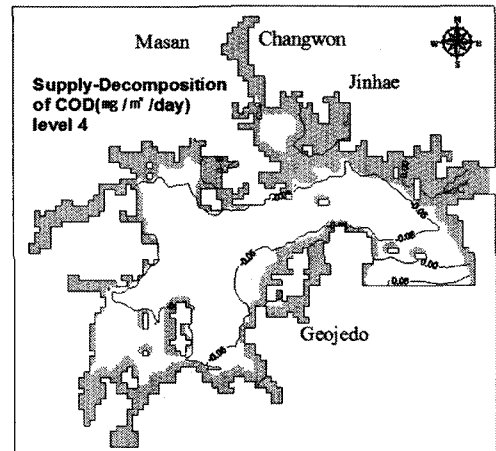
(a) Level 1



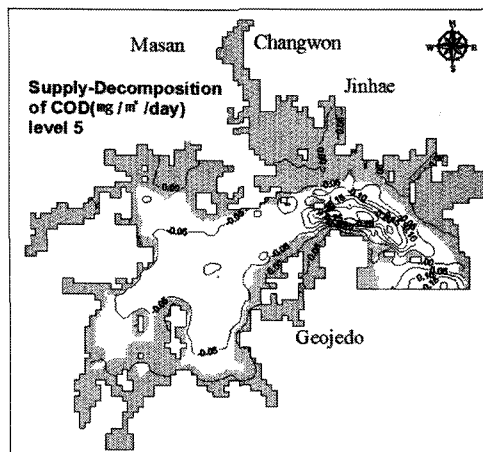
(b) Level 2



(c) Level 3

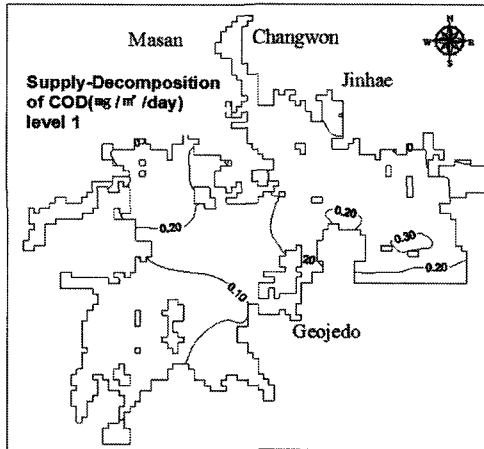


(d) Level 4

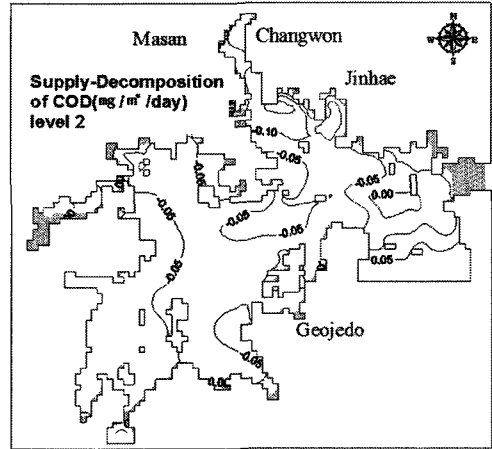


(e) Level 5

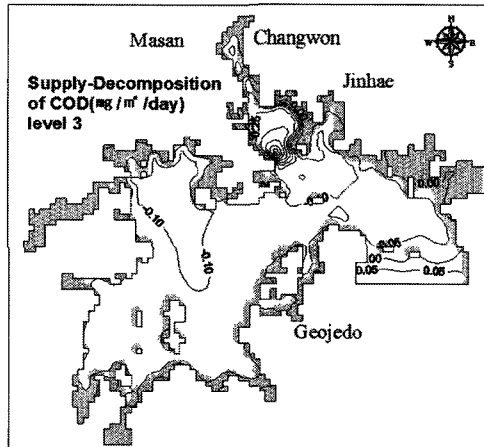
Fig. 6. Distribution of the simulated rate of the supply and decomposition of COD in 100% reduction of land based input loading and sediment release nutrients at each level in the model area(-, net decomposition; +, net supply; dotted, sediment).



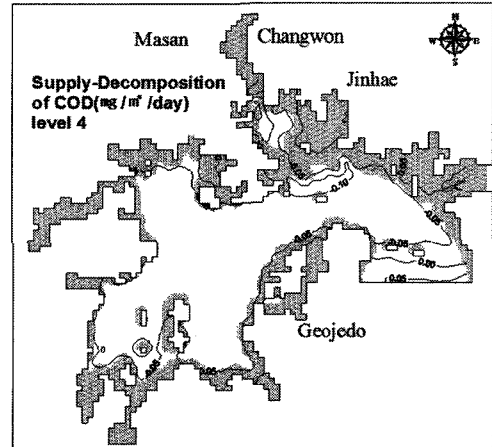
(a) Level 1



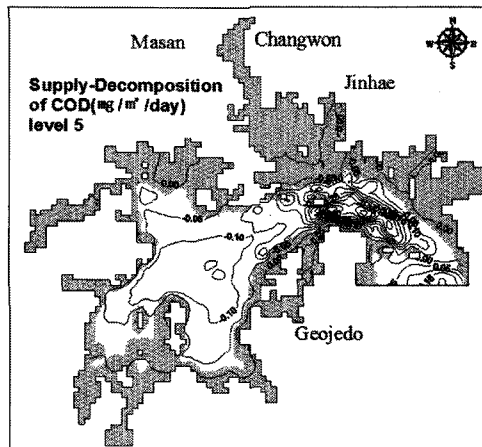
(b) Level 2



(c) Level 3



(d) Level 4



(e) Level 5

Fig. 7. Distribution of the simulated rate of the supply and decomposition of COD in 90% reduction of land based input loading in nutrients only at each level in the model area(-, net decomposition; +, net supply; dotted, sediment).

지역에서는 0.50~0.60 mg/m²/day 이상의 높은 값을 나타내어 가막만의 여천항 인근지역 보다 더 높은 순증가 값을 나타내었다. 또한, 진동만도 0.20~0.30 mg/m²/day로 높게 나타났으며, 만 중앙부도 가막만 보다 2~3배 가까이 높은 순증가율을 보였다. 3층~저층의 경우는 마산항 인근을 제외한 대부분의 지역에서 순감소를 나타내었는데, 만 중앙부에서는 -0.10 mg/m²/day의 높은 감소율을 보였으며, 3층에서 덕동 하수처리장 방류구 부근에서는 0.50 mg/m²/day 이상의 높은 값이 나타나고 있었다.

표층의 경우 만 입구를 포함한 대부분의 지역에서 순증가가 일어났는데, COD의 물리과정량과 비교해 볼 경우 물리적 이송이 있는 부근에서, 순증가가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 만 입구 경계에서는 감소가 나타났던 가막만과는 달리 진해만에서는 외양 경계부근도 생물 생산성이 높다는 것을 관찰할 수 있으며, 이것은 진해만 해역 전체의 수질을 관리하기 위해서는 낙동강 수역의 영향을 배제할 수가 없다는 점에서 시사하는 바가 크다고 볼 수 있다.

3.4. 부하량 변동과 COD의 생물과정량의 변화

COD의 농도는 외부부하의 증감에 따라 변동을 하게 되는데, 외부 부하량의 변동은 물질의 물리적인 이류확산보다는 생물학적 과정에 영향을 주기 때문에 시스템 내의 COD의 순증가와 순감소가 부하량 변동에 따라 어떻게 변화하는가를 살펴보는 것은 장래의 육상부하 삭감계획에 좋은 정보를 제공할 것이다. 유입부하량 삭감시, 모델 내 각 cell에서 계산된 COD의 공급항 및 감소항의 차를 구하여 계산한 총별 COD의 순증가율 또는 순감소의 공간적인 분포패턴의 변화를 살펴보았다.

생태계 모델을 이용한 각 부하삭감 시뮬레이션은 육상부하량만 50 및 70% 삭감한다고 가정할 경우와 육상으로부터 유입되는 오염부하 중에서 영양염을 90% 제거 했다고 가정했을 경우 및 부하육상부하와 저질 용출 부하를 각각 100% 모두 삭감한다고 가정하는 등 4가지의 Case에 대해 각각 시뮬레이션하였다²⁶⁾.

유입부하의 50%를 삭감하였을 경우(Fig. 4)에는 진해만 중앙부~서측해역 혹은 2층 이하의 저층에서는 큰 변화가 없었으나, 마산만 내측의 순증가가 감소되는 경향이 뚜렷이 나타났다. 유입부하의 70%~100%를 삭감하였을 경우(Fig. 5~6)에는 마산만 내측에서의 순증가가 뿐 만 아니라 순감소도 같이 줄어서 전체 적인 생물대사가 감소하는 경향을 나타내었다. 유기물을 제외한 영양염만 삭감하였을 경우(Fig. 7)에도 유입부하의 100%를 삭감하였을 때와 유사한 패

턴을 보이고 있는데, 이것은 진해만 해역의 COD 농도는 식물플랑크톤과 같은 자생 유기물에 의한 내부 생산이 크기 때문에 영양염만을 제거 하여도 COD 농도의 순증가가 감소하는 경향을 볼 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

생태계 모델계산 과정을 통해 진해만에서 COD의 물리과정량과 순증가/감소율을 산정하였다. COD의 물리과정량 계산결과 표층의 부하유입지점과 생물생산이 큰 지점에서 이송현상이 주로 일어나며, 저층으로 갈수록 축적현상이 탁월한 것으로 나타났으며, 하수처리장 방류구 지점에서 이송된 물질이 인근 지역으로 영향을 미치고 있는 것을 볼 수 있었다. 이는 영양염 거동을 포함한, 이외의 오염물질들의 거동도 이와 같은 패턴을 나타낼 가능성이 높을 것으로 사료된다.

표층에서는 대부분의 지역에서 0.10 mg/m²/day 이상의 순증가율을 나타내었으며, 3층~저층의 경우는 만 중앙부에서는 -0.10 mg/m²/day의 높은 순감소를 나타내고 있었다.

오염부하 삭감과 COD의 순증가/감소의 분포 양상은 50% 이상 부하삭감시부터 마산만 내측을 중심으로 순증가가 낮아지는 것으로 나타났으며, 영양염만을 제거 하여도 COD 농도를 낮출 수 있는 것으로 계산되었다.

이상의 결과에서, 진해만의 경우 저층의 만 중앙부에서 만 북부에 이르는 해역에서 COD의 물리적인 축적현상과 생물, 화학적 분해현상이 탁월한 것으로 나타났다. 이는 이 지역에 대한 유기물의 지속적인 공급과 활발한 분해가 일어남을 의미하며, 이에 따른 용존산소의 소비도 클 것으로 판단되어, 이에 대한 조사, 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장환경용량산정연구, RP-2007-ME-024)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 김차검, 이필용, 1994, 진해만의 수괴구조와 용존 산소 분포, 한국수산과학회지, 27(5), 572-582.
- 2) 박주석, 김종두, 1967, 진해만 적조현상에 관한연구, 국립수산진흥원 연구보고, 43, 63-79.
- 3) 박청길, 1975, 진해만 해수의 부영양화와 Chlorophyll 분포, 한국수산과학회지, 8(3), 121-126.
- 4) 양동범, 1987, 진해만 영양염과 클로로필 a 농도

- 의 일주변화, 적조현상과 어장보전, 국립수산진흥원, 39pp.
- 5) 김종구, 조은일, 1999, 진해만에 있어서 COD의 시공간적인 특성 및 결정인자, 한국환경과학회지, 8(2), 189-195.
 - 6) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 27(4), 414-433.
 - 7) 김종구, 박청길, 신성교, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링 (I) - 생태계모형을 이용한 식물플랑크톤 농도 분포 시뮬레이션, 한국해양환경공학회지, 17(2), 121-135.
 - 8) 엄기혁, 2007, 이때때의 생물정화기작을 이용한 마산만의 수질개선방안, 박사학위논문, 환경공학과, 부경대학교, 부산.
 - 9) 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.
 - 10) Kremer J. N., Nixon S. W., 1978. A coastal marine ecosystem, In: Simulation and Analysis, Ecological Studies, 24. Springer, Berlin. 217pp.
 - 11) Nakata K., Taguchi K., 1982, Numerical simulation of eutrophication process coastal bay by eco-hydrodynamic model. (2) Ecological modeling, Bulletin of the National Research Institute of Pollution and Resources, 12(3), 17-36.
 - 12) 최우정, 전영렬, 박정흠, 박영철, 1997, 한산·거제만의 환경특성이 양식굴의 비만에 미치는 영향, 한국수산학회지 30(5), 794-803.
 - 13) 김종구, 김양수, 조은일, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용 - 2. 오염부하의 정량적 관리, 한국수산학회지, 35(4), 356-365.
 - 14) 해양수산부, 2007, 연안오염총량관리 기본계획 수립연구 (I)(안), 451-459.
 - 15) 이대인, 조은일, 박청길, 1999, 가막만에서의 기초생산력 향상방안에 관한 생태계모델링, 대한환경과학회지, 8(5), 575-586.
 - 16) 홍석진, 2004, 남해안의 유해적조 발생에 관한 생태계 모델링, 박사학위논문, 환경공학과, 부경대학교, 부산.
 - 17) 김종구, 김양수, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용 - 1. 해역의 수질 특성 및 저질의 용출 부하량 산정, 한국수산학회지, 35(4), 348-355.
 - 18) 김동명, 1999, 생태계모형을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 박사학위논문, 환경공학과, 부경대학교, 부산.
 - 19) Jorgensen S. E., 1979, Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters, International Society for Ecological Modeling, 46pp.
 - 20) Eppley R. W., 1972, Temperature and phytoplankton growth in the sea, Fish. Bull. Nat. Ocean. Atmos. Adm., 70(4), 1063-1085.
 - 21) Thomann R. V., DiToro D. M., Winfield R. P., O'Connor D. J., 1975, Mathematical modeling of phytoplankton in Lake Ontario-I. Model development and verification, US EPA National Environmental Research Center Office of Research and Development, EPA-660/3-75-005 US, 27pp.
 - 22) DiToro D. M., O'Connor D. J., Thomann R. V., 1971, A dynamic model of the phytoplankton population in the Sacramento-San Joaquin Delta. In: Hem JD(ed) Nonequilibrium systems in natural water chemistry, Advances in Chemistry Series 106, American Chemical Society, 131pp.
 - 23) Collins C. D., 1980, Formulation and validation of a mathematical model of phytoplankton growth, Ecology, 61, 639-649.
 - 24) 홍석진, 이원찬, 박종수, 오현택, 윤상필, 김형철, 김동명, 2007, 생태계 모델링을 이용한 진해만의 자생 COD 평가, 한국환경과학회지, 16(8), 959-971.
 - 25) 김동명, 2005, 가막만의 COD 거동 및 분포 특성 평가를 위한 생태계 모델링, 한국환경과학회지, 14(9), 835-842.
 - 26) 홍석진, 이원찬, 정래홍, 오현택, 장주형, 구준호, 김동명, 2007, 2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링, 해양환경안전학회지, 13(2), 103-110.