

가막만의 COD 거동 및 분포 특성 평가를 위한 생태계 모델링

김 동 명

부경대학교 환경시스템공학부

(2005년 7월 8일 접수; 2005년 9월 9일 채택)

Ecological modeling for estimation of a transport and distribution of COD in Kamak Bay

Dong-Myung Kim

Division of Environmental System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Manuscript received 8 July, 2005; accepted 9 September, 2005)

The three-dimensional eco-hydrodynamic model was applied to estimate the physical process in terms of COD (chemical oxygen demand) and net supply(or decomposition) rate of COD in Kamak Bay to find proper management plan for oxygen demanding organic matters. The estimation results of the physical process in terms of COD showed that transportation of COD is dominant in surface level while accumulation of COD is dominant in bottom level. In the case of surface level, the net supply rate of COD was $0\sim 0.50$ mg/m²/day. The net decomposition rate of COD was $0\sim 0.04$ mg/m²/day in middle level(3~6m) and $0.05\sim 0.15$ mg/m²/day in bottom level(6m~bottom). These results indicates that the biological decomposition and physical accumulation of COD are occurred predominantly at the northern part of bottom level. Therefore, it is important to consider both allochthonous and autochthonous oxygen demanding organic matters in the region.

Key Words : Ecological modeling, Eco-hydrodynamic model, COD, Transport, Accumulation, Net supply rate, Net decomposition rate, Kamak Bay

1. 서 론

가막만은 남해안에 위치한 반폐쇄성 내만으로 기초생산력이 높고 많은 종류의 어패류가 서식하여 각종 어패류 양식이 활발히 행해지고 있으며, 해양생태계가 비교적 양호하여 지속적으로 보전할 필요가 있는 환경보전해역으로 지정되어 있다¹⁾.

그러나 인구집중으로 인한 생활하수 및 폐수의 유입증가로 인하여 부영양화가 심화되고 적조현상과 빈산소수괴의 발생이 빈발하고, 이로 인한 피해가 속출하는 악순환이 거듭되고 있다. 또한 연안역에 밀집되어 있는 해산어 육상축양장은 인근 해수를 평평하여 사육수로서 사용한 후 간단한 침전시

설만 거친 후 배출하고 있는 실정이며, 이 해수를 다시 사육원수로 사용하고 있어 연안해역의 환경악화에 의한 각종 질병의 다발 등으로 인한 양식 생산성이 감소하고 있는 실정이다²⁾.

육상 오염원으로부터의 외부유입유기물과 해역의 식물플랑크톤의 증식에 따른 자생유기물의 증가는 연안해역의 용존산소를 소모하여 빈산소수괴를 발생시키는 등 환경오염을 더욱 심화시킨다. 화학적 산소요구량(COD; chemical oxygen demand)은 이러한 외부유입유기물과 해역에서 생성된 자생유기물이 환경에 미치는 영향을 파악하는데 유용한 지표로 사용될 수 있다. 그러나, COD가 해역의 어느 지역에서 축적 또는 희석, 확산될 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 결

Corresponding Author : Dong-Myung Kim, Division of Environmental System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
Phone: +82-51-620-6440
E-mail: dmk5260@chol.com

과는 육상 오염원의 해역으로의 배출지역 선정이나 양식장의 위치 선정 등에도 참고할 수 있으며, 이를 위해서는 생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)이 유용한 수단이 될 수 있다^{3,4)}. 본 연구에서는 가막만의 COD 거동 및 분포특성을 파악하기 위하여 조⁵⁾와 김⁶⁾에 의하여 가막만에 대한 적용성이 검토된 생태-유체역학모델을 사용하였다.

시뮬레이션 결과의 COD 현존량이 결정되기까지의 과정 중 이류와 확산작용에 의한 물리과정량을 산정하여 만 내의 어떤 지역에서 COD의 축적현상이 일어나는지를 파악하며, 지역적 분포에 따른 COD의 순증가를 또는 순감소율을 산정하여, 수질관리 방안의 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 생태계 모델링

본 연구에서 사용된 생태-유체역학 모델(Eco-hydrodynamic model)은 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층 모델과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델로 구성되어 있으며, 다층모델은 中田⁷⁾ 등에 의해 개발 적용되어진 모델이며, 생태계 모델은 Kremer 와 Nixon⁸⁾에 의해서 개발, 적용된 모델의 지배방정식을 바탕으로 하여 Nakata 등⁹⁾에 의해 그리드 모델 형태로 재구성된 모델이다. Kremer 와 Nixon의 모델 및 Nakata 모델의 기본 다이어그램은 Fig. 1과 2에 각각 나타내었다. 이 모델링 시스템은 최¹⁰⁾, 김¹¹⁾,

조¹⁾, 김¹²⁾ 등에 의하여 국내 연안환경에 적합하도록 연구 개량되어 그 적용성이 검토된 모델이다.

생태계 모델에 적용된 해역의 임의 지점에 있어 구성요소의 현존량(B)의 시간에 따른 농도 변화는 식 (1)의 방정식으로 기술된다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z}$$

조석류 또는 잔차류에 의해서 운반되는 이류효과를 나타내는 항

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right]$$

난류확산(혼합)을 나타내는 항

$$+ \frac{dB}{dt}$$

생물·화학적인 모든 과정을 포함하는 항

(1)

식 (1)에서 생물·화학적인 과정을 포함하는 항을 제외한 부분은 이류와 확산에 의해서 대상물질이 물리적으로 이송, 확산되는 현상을 표현하며, 이를 대상물질의 물리과정량이라 한다^{4,13)}. 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, 확산

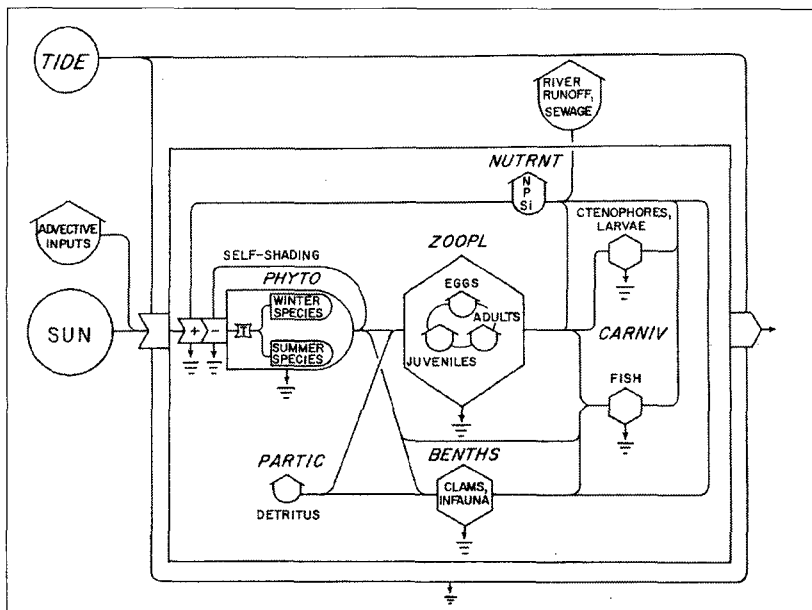


Fig. 1. Energy flow diagram and the conceptual framework for the ecosystem model.

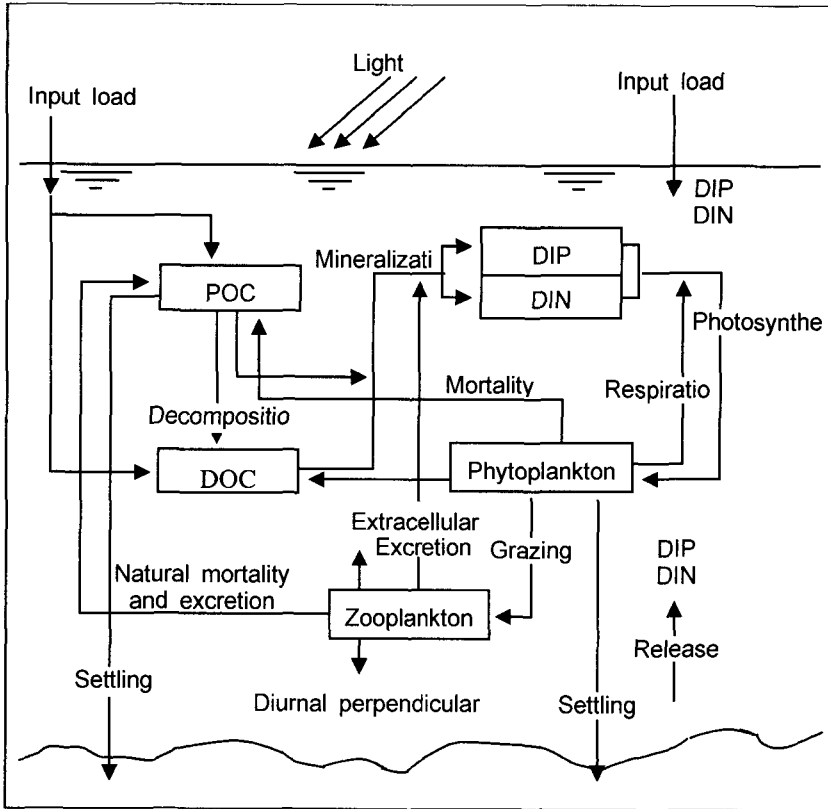


Fig. 2. The schematic diagram for the cycle of nutrients(N and P) in the model.

될 가능성이 높음을 나타낸다.

식 (1)에서 물리과정량 부분을 제외하면 생물·화학적 과정 부분에 관하여 나타낼 수 있다^{3,4)}. 모델 내 각 cell에서 COD의 생물·화학적 변화는 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤, 현탁유기물, 용존유기물의 함수이며 식 (2)와 같아진다.

$$\left(\frac{dCOD}{dt}\right)^* = + [COD: C_p] \left(\frac{dP}{dt}\right)^* + [COD: C_z] \left(\frac{dZ}{dt}\right)^* + [COD: C_{POM}] \left(\frac{dPOC}{dt}\right)^* + [COD: C_{DOM}] \left(\frac{dDOC}{dt}\right)^* \quad (2)$$

생태계 모델내의 식물플랑크톤과 동물플랑크톤, 현탁유기물, 용존유기물에 대한 생물·화학적 반응식은 각각 식 (3)~(6)과 같다. 식 (3)~(6)에 나타난 바와 같이 COD농도를 증가시키는 항으로는 식물플랑크톤의 광합성 및 동물플랑크톤의 섭식, 제외로부터의 공급 등이 있으며, 감소시키는 항으로는 식물플랑크톤의 침강 및 호흡, 현탁유기물의 침강, 용존유기물의 무기화 등이 있다. 그 이외의 식물플랑크

톤의 분비 및 사멸, 동물플랑크톤의 배설 및 사망, 현탁유기물의 분해 등은 조건에 따라 공급 또는 감소의 항이 된다. 이를 바탕으로 하여 각 cell에서의 COD의 생물·화학적 공급에 의한 증가항과 분해에 의한 감소항의 차를 구하여 COD의 순증가 또는 순감소를 계산하였다.

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)^* = + \{1 - \mu_3(P)\} \nu_1(T) \mu_1(DIP, DIN) \mu_2(I) \cdot P \quad \text{식물플랑크톤의 광합성}$$

$$- \nu_2(T) \cdot P \quad \text{식물플랑크톤의 호흡}$$

$$- \nu_3(T) \cdot Z \quad \text{식물플랑크톤의 분비}$$

$$- \nu_4(T) \cdot P \quad \text{식물플랑크톤의 사멸}$$

$$- W_p \frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{식물플랑크톤의 침강} \quad (3)$$

$$\left(\frac{dZ}{dt}\right)^* = + \nu_3(T) \cdot Z \quad \text{동물플랑크톤의 섭식}$$

$$- (1 - \mu) \nu_3(T) \cdot Z \quad \text{동물플랑크톤의 배설}$$

$$- (\mu - \nu) \nu_3(T) \cdot Z \quad \text{동물플랑크톤의 배소}$$

$$- \nu_5(T) \cdot Z \quad \text{동물플랑크톤의 사멸} \quad (4)$$

$$\left(\frac{dPOC}{dt}\right)^* = -W_{POC} \frac{\partial POC}{\partial z} - v_6(T) \cdot (POC) + v_4(T) \cdot P + v_5(T) \cdot Z + v_3(T) \cdot Z + q_{oc}$$

현탁유기탄소의 침강 현탁유기탄소의 분해
 식물플랑크톤의 사멸 동물플랑크톤의 배설
 동물플랑크톤의 사멸 계외로부터 공급 (5)

$$\left(\frac{dDOC}{dt}\right)^* = +\mu_3(P) \cdot v_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I) \cdot P + \frac{k}{1+k} v_6(T) \cdot POC - v_7(T) \cdot DOC + q_{oc}$$

식물플랑크톤의 분비
 현탁유기물의 분해 용존무기물의 무기화
 계외로부터 공급 (6)

2.2. 대상해역 및 입력자료

대상해역인 가막만은 여수반도 남단과 돌산도에 둘러싸인 남북방향 15 km, 동서방향 9 km의 타원형의 내만이다. 평균 수심은 약 9 m이며 해수면 하 용적은 $10.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 면적은 147.5 km^2 이다⁵⁾.

대상해역은 동서 및 남북방향으로 각각 250 m로 분할하였으며, 수심방향은 표층(0~3m), 중층(3m~6m), 저층(6m~해저)으로 구분하여 격자의 총수는 13,500개(60×75×3)로 구성하였다. 초기치와 경계치 및 계수값들은 1997~2001년에 실측한 자료와 기존의 연구에서 적용한 값들을 기초로 Table 1과 같이 구성하였다. Table 2에 나타난 생태계 모델의 수식화에 사용된 생물과라메타의 기호, 정의, 단위 및 적용값은 기존의 연구^{1,6,14)}에서 산정된 값을 이용하였다. 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤, 현탁유기탄소, 용존유기탄소의 COD 전환 계수는 조¹⁾의 연구를 바탕으로 적용하였다. 해수유동모델에 의한 가막만의 유동 특성은 김⁶⁾의 연구에서 적용된 결과를 사용하였다.

Table 1. Input data for an ecosystem model

Parameters		Input values						
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 250\text{m}$						
Level		1 (0~3m), 2 (3~6m), 3 (6m~bottom)						
Time interval		900sec						
Pollutant loads		Refer to reference [6], [14]						
Initial condition for compartments								
Level	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIP ($\mu\text{g-at/L}$)	DIN ($\mu\text{g-at/L}$)	POC (mg-C/m ³)	DOC (mg-C/m ³)	Phytoplankton (mg-C/m ³)	Zooplankton (mg-C/m ³)
1	7.56	1.00	0.50	1.00	340.0	1270.0	212.81	25.0
2	6.49	1.00	0.50	1.10	387.0	1590.0	177.40	25.0
3	6.49	1.00	0.50	1.10	482.0	1450.0	130.12	25.0
Boundary condition for compartments								
Level	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIP ($\mu\text{g-at/L}$)	DIN ($\mu\text{g-at/L}$)	POC (mg-C/m ³)	DOC (mg-C/m ³)	Phytoplankton (mg-C/m ³)	Zooplankton (mg-C/m ³)
1	8.05	1.02	0.81	0.50	400.0	2500.0	285.35	35.0
A 2	6.50	1.10	0.82	0.50	400.0	3500.0	285.35	35.0
3	6.50	1.10	0.82	0.50	550.0	3500.0	285.35	35.0
1	7.48	1.00	0.58	0.60	438.0	2630.0	256.80	35.0
B 2	5.53	1.39	0.80	0.60	318.5	3420.0	227.04	35.0
3	5.53	1.39	0.80	0.60	526.1	3260.0	227.04	35.0
1	7.27	1.50	0.50	0.50	438.0	2630.0	256.80	35.0
C 2	6.92	2.20	0.50	0.60	318.5	3420.0	227.04	35.0
3	6.92	2.20	0.50	0.60	526.1	3260.0	227.04	35.0
1	7.27	0.93	0.58	1.04	438.0	2630.0	256.80	35.0
D 2	6.92	1.20	0.60	2.08	318.5	3420.0	227.04	35.0
3	6.92	1.20	0.60	2.08	526.1	3260.0	178.66	35.0

Horizontal viscosity coefficient 1.0 E5 (cm²/s)
 Horizontal diffusion coefficient 1.0 E5 (cm²/s)
 Vertical diffusion coefficient Level 1~3 : 0.1 (cm²/s)

Table 2. The biological parameters used in the ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit	Input values
1	α_1	Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	1.56
2	α_2	Respiration rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.05
3	α_3	Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.18
4	α_4	Death rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.03
5	α_5	Natural death rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.05
6	α_6	Mineralization rate of POC at 0°C	day ⁻¹	0.05
7	α_7	Mineralization rate of DOC at 0°C	day ⁻¹	0.003
8	α_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	$\mu\text{g-at/L}$	0.536
10	K_{SN}	Half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	$\mu\text{g-at/L}$	6.057
11	I_{opt}	Optimum intensity of radiation for photosynthesis	ly/day	195.8
12	I_{max}	Maximum intensity of sunlight at sea surface	ly/day	461.5
13	k_0	Dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m ⁻¹	0.34
14	P^*	Function of grazing	mg C/m ³	70
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	%	35
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	0.1
21	W_{POC}	Settling velocity of detritus(POC)	m/day	0.3
22	[COD : C _P]	ratio of COD/C for phytoplankton	-	9.07E-4
23	[COD : C _Z]	ratio of COD/C for zooplankton	-	1.07E-3
24	[COD : C _{POM}]	ratio of COD/C for detritus(POC)	-	1.01E-3
25	[COD : C _{DOM}]	ratio of COD/C for DOC	-	1.00E-3

3. 결과 및 고찰

생태계 시뮬레이션 결과가 실제 가막만의 수질을 잘 재현하는지 검토하기 위하여 2001년 하계의 실측치와 비교하였다. COD 농도의 계산치와 관측치를 비교한 결과 상대오차는 평균 14.4%로 나타났으며, 단순회귀분석결과 실측치와 계산치의 관계정도를 나타내는 상관계수 R(correlation coefficient)은 0.8962로 나타났다. COD 농도의 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수 R²(coefficient of determination)는 0.8032로 나타나 표본회귀선이 전체자료의 80%이상을 반영하는 것으로 나타났다(Fig. 3).

이상의 결과로 볼 때 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 적합하게 재현된 것으로 나타났다.

3.1. COD의 물리과정량

생태계 모델을 이용한 COD의 층별 물리과정량 계산결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이류 및 확산에 의한 COD의 유입량이 유출량보다 많아 축적현상이 일어나는 지역은 검은색으로 표시하였으며, 유출량이 유입량보다 많아 cell로의 이송현상이 나타나는 지역은 흰색으로 표시하였다. 중층과 저층의 경우는 지역에

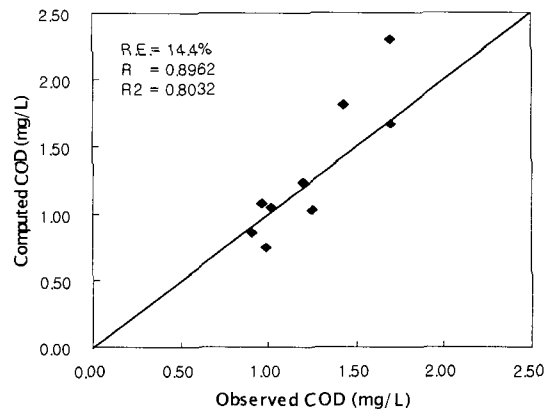


Fig. 3. Comparison of the observed and simulated chemical oxygen demand in Kamak Bay.

따라 각각 3m 및 6m 미만의 수심을 가지는 곳이 있게 되는데, 이러한 지역은 사선으로 나타내었다.

표층의 경우, 물리과정량이 양의 값을 나타내어 축적현상이 주로 일어나는 지역은 만 중앙부과 여천과 여수 인근지역의 해안부분인 것으로 나타났으

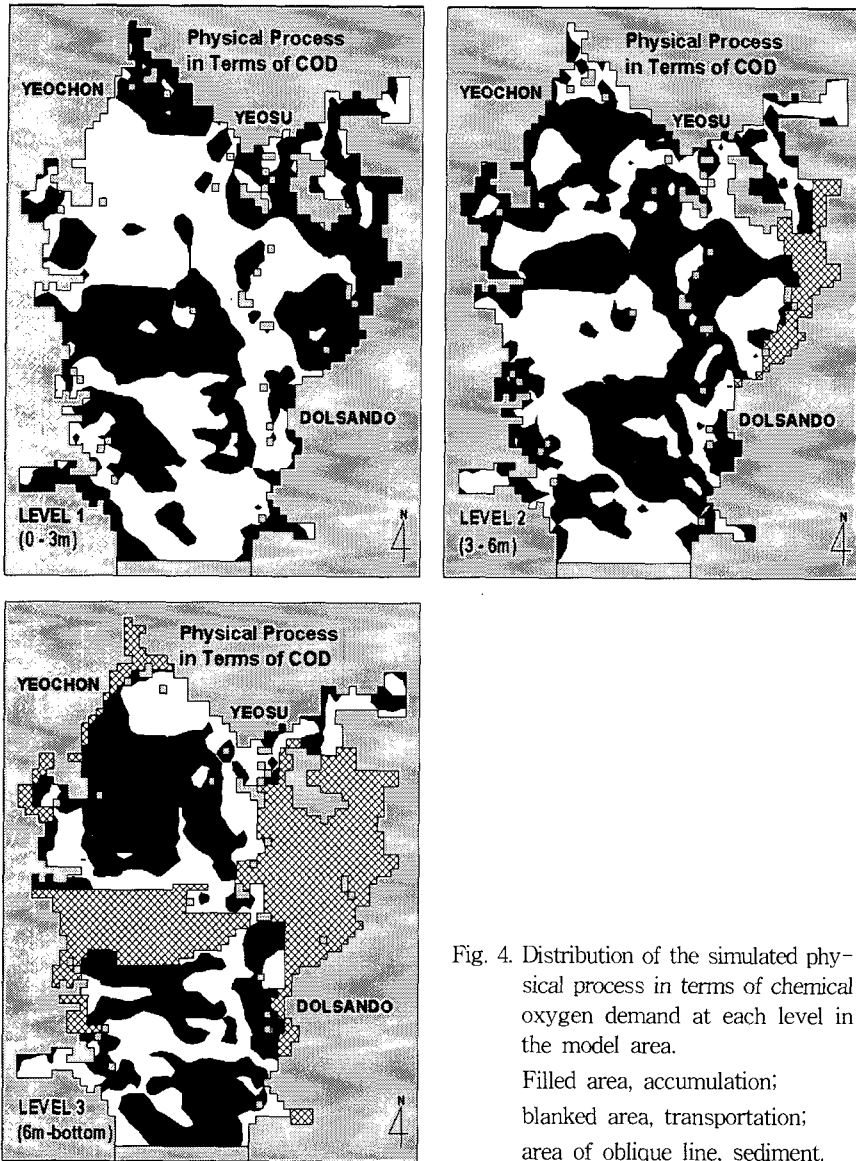


Fig. 4. Distribution of the simulated physical process in terms of chemical oxygen demand at each level in the model area.

Filled area, accumulation;
 blanked area, transportation;
 area of oblique line, sediment.

며, 그 외의 지역에서는 음의 값을 나타내어 이송현상이 탁월한 것으로 나타났다. 저층의 경우는 만의 대부분의 지역에서 유입량이 유출량보다 큰 것으로 나타나 축적현상이 주로 일어나는 것으로 평가되었다. 중층의 경우는 축적 현상이 나타나는 지역과 이송현상이 일어나는 지역의 크기가 비슷하게 나타났으며, 그 분포는 표층과 반대의 경향을 나타내었다. 층별로는 표층에서 이송현상이 탁월하게 나타났으며 저층으로 갈수록 축적현상이 증가하는 경향을 나타내었다.

이는 본 대상해역에 대하여 김⁴⁾이 조사한 영양염의 거동과 유사한 분포를 나타내어, 이들 이외 오염

물질들의 이송 및 축적현상도 이와 유사한 거동 패턴을 가질 가능성이 높을 것으로 사료된다.

3.2. COD의 공급 및 분해

식 (2)에 의하여 생태계 모델내 각 cell에서 계산된 COD의 공급량 및 감소량의 차를 구하여 계산한 층별 COD의 순증가를 또는 순감소율의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 양의 값을 가지는 지역은 COD의 공급이 탁월하여 순증가가 일어나는 지역을 나타내며, 음의 값을 가지는 지역은 유기물의 분해 현상이 탁월하여 순감소가 일어나는 지역을 나타낸다. 물리과정량과 마찬가지로 중층과 저층의 수심이 낮은 지역은 사선으로 나타내었다.

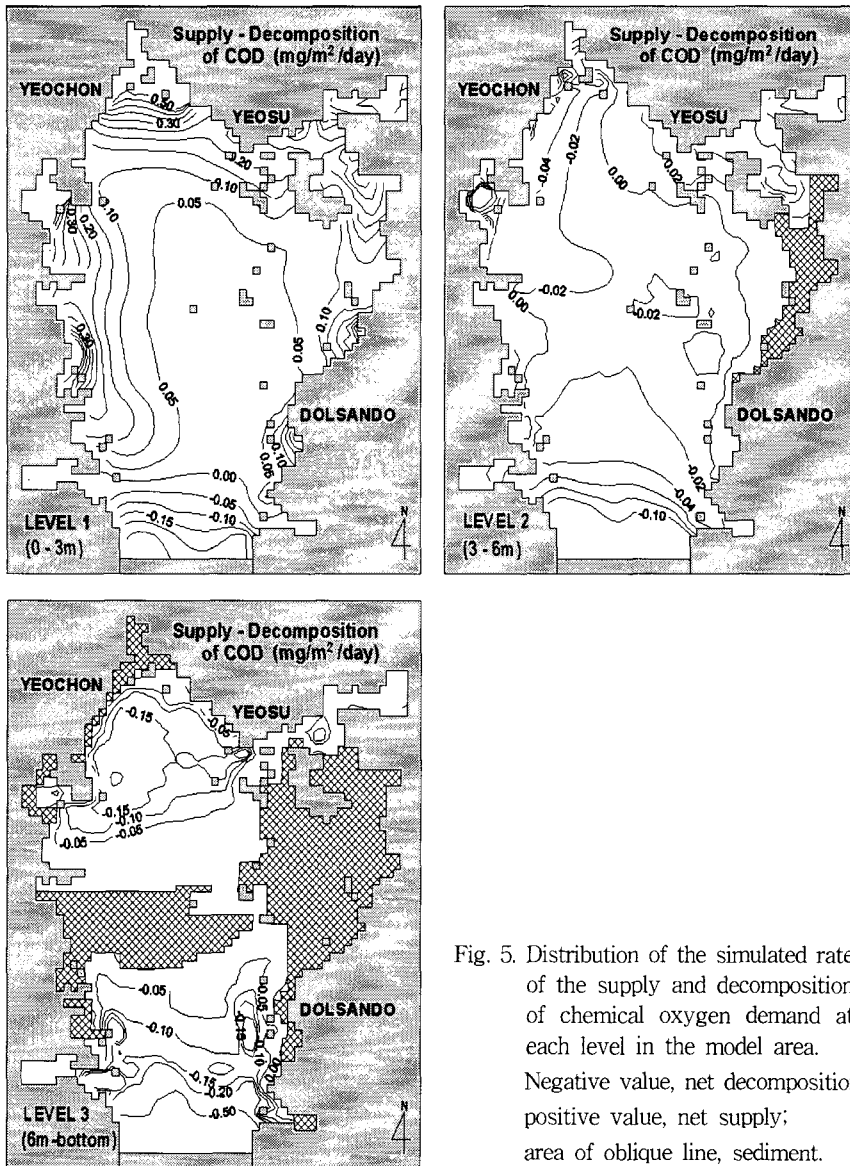


Fig. 5. Distribution of the simulated rate of the supply and decomposition of chemical oxygen demand at each level in the model area. Negative value, net decomposition; positive value, net supply; area of oblique line, sediment.

표층의 경우, 만 입구를 제외한 대부분의 지역에서 순증가가 일어났다. COD 순증가율의 크기는 연안에서는 $0.10 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 값을 보였으며, 여천항 인근 지역에서는 $0.50 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 높은 값을 나타내었다. 만 중앙부의 순공급율은 $0.05 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 정도로 나타났다. 중층의 경우는 여수항 인근을 제외한 대부분의 지역에서 순감소가 일어났으며, 그 크기는 만 중앙부에서는 $0 \sim 0.02 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, 여천항 부근과 만 입구 측에서는 $0.04 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 정도의 값을 나타내었다. 저층에서는 전 지역에서 순감소가 일어났으며, 만 중앙부에서 $0.05 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, 여수 및 여천항 인근의 만 북부 지역에서는 0.15

$\text{mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 값을 나타내었다.

4. 결 론

생태-유체역학모델을 이용하여 가막만에 대한 COD의 물리과정량 및 순증가 또는 감소율을 산정하여, 수질관리 방안의 선택을 위한 자료로 제공하였다. 시뮬레이션 결과, 계산치와 관측치의 상대오차가 평균 14.4%, 상관계수가 0.8962, 결정계수가 0.8032로 나타나 양호하게 재현된 것으로 나타났다.

표층에서는 대부분의 지역에서 $0 \sim 0.50 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 정도의 순증가율을 나타내었으며, 중층에서는 여수항 인근을 제외한 대부분의 지역에서 $0 \sim 0.04 \text{ mg/}$

m²/day 정도의 순 감소를 나타내었다. 저층에서는 대부분의 지역에서 0.05 mg/m²/day 이상의 순감소를 나타내었으며, 만 북부지역에서는 0.15 mg/m²/day 이상의 값을 나타내었다.

COD의 물리과정량 계산결과 표층에서는 이송현상이 주로 일어나며, 저층으로 갈수록 축적현상이 탁월한 것으로 나타났다. 이는 영양염 거동에 대한 기존의 연구와 유사한 분포를 나타내어, 이외의 오염물질들의 거동도 이와 같은 패턴을 나타낼 가능성이 높을 것으로 사료된다.

이상의 결과에서, 가막만의 경우 저층의 만 중앙부에서 만 북부에 이르는 해역에서 COD의 물리적인 축적 현상과 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.

참 고 문 헌

- 1) 조은일, 1996, 생태계모형을 이용한 어장환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 1-119.
- 2) 박순현, 2000, 해산어 육상축양장의 수질개선을 위한 오존처리 시스템의 적용에 관한 연구, 여수대학교 대학원 석사학위논문, 1-125.
- 3) Kim, D. M., 2003, Ecological modeling for estimation of environmental characteristics in Masan Bay, *Journal of the Korean Environmental Sciences*, 12(8), 841-846.
- 4) 김동명, 2003, 생태계 모형을 이용한 가막만의 영양염 거동 특성 평가, *한국환경과학회지*, 12(7), 745-751.
- 5) 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 가막만의 환경용량산정(I) -생태계모형을 이용한 기초생산력 산정, *한국수산학회지*, 29(3), 369-385.
- 6) 김동명, 장주형, 조현서, 2003, 육상축양장 배출수 처리에 의한 가막만의 수질개선 시뮬레이션, *한국해양환경공학회지*, 6(1), 44-59.
- 7) 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, *沿岸海洋研究ノト*, 22(2), 96-108.
- 8) Kremer, J. and S. Nixon, 1978, A coastal marine ecosystem: Simulation and analysis, Springer-Verlag, 16pp.
- 9) Nakata, T. K., 1991, A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay, *KAIKOU5-2*, 1-26.
- 10) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 수치실험, *한국수산학회지*, 27(4), 414-433.
- 11) 김광수, 박청길, 조은일, 1996, 생태계 모형을 이용한 황해의 환경용량 산정, *한국수질보전학회지*, 12(4), 383-3993.
- 12) 김종구, 김양수, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모형의 적용 2. 오염부하의 정량적 관리, *한국수산학회지*, 35(4), 356-365.
- 13) 日本通商産業省, 1991, 兵名湖・磐田地域 産業公害 總合事前調査, 資源環境技術研究所.
- 14) 환경부, 2000, 해산어 육상축양장의 수질개선 및 연안환경 개선을 위한 오존처리 시스템의 개발.