

생태계모형을 이용한 가막만의 영양염 거동 특성 평가

김 동 명

일본국립환경연구소 화학물질 환경리스크 연구센터
(2003년 5월 19일 접수; 2003년 7월 16일 채택)

Estimation of Nutrients Transport in Kamak Bay using the Eco-hydrodynamic Model

Dong-Myung Kim

Research Center for Environmental Risk, The National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 305-8506, Japan
(Manuscript received 19 May, 2003; accepted 16 July, 2003)

The three-dimensional eco-hydrodynamic model was applied to estimate the physical process in terms of nutrients and net uptake(or regeneration) rate of nutrients in Kamak Bay for scenario analysis to find proper management plan. The estimation results of the physical process in terms of nutrients showed that transportation of nutrients is dominant in surface level while accumulation of nutrients is dominant in bottom level. In the case of dissolved inorganic nitrogen, the results showed that the net uptake rate was 0~60 mg/m²/day in surface level(0~3m), and the net regeneration rate was 0.0~10.0 mg/m²/day in middle level(3~6m) and above 10 mg/m²/day in bottom level(6m~below). In the case of dissolved inorganic phosphorus, the net uptake rate was 0.0~3.0 mg/m²/day in surface level, and the net regeneration rate was 0.5~1.5 mg/m²/day in middle level and 1.0~3.0 mg/m²/day in bottom level. These results indicates that net uptake and transport of nutrients are occurred predominantly at the surface level and the net generation and accumulation are dominant at bottom level. Therefore, it is important to consider the re-supplement of nutrients due to regeneration of bottom water.

Key words : Eco-hydrodynamic model, Nutrient, Transport, Accumulation, Net uptake rate, Net regeneration 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 있다³⁾.

빈산소 수괴 및 적조발생 등은 부영양화된 폐쇄성 내만에서 빈번하게 일어나며, 이러한 부영양화에 따른 여러 오염 현상은 식물플랑크톤의 증식과 관련이 있다. 또한 식물플랑크톤은 양식 어패류의 먹이 생물이기도 하다. 이러한 식물플랑크톤의 과다한 증식을 제어하기 위해서는 식물플랑크톤의 증식에

필요한 기상조건, 빛, 물의 유동, 수온, 염분, 영양염류 등의 요소 중 인위적인 통제가 비교적 용이한 영양염에 대한 고찰이 필요하다. 영양염에 관해서는 많은 연구가 이루어져 왔으나, 영양염이 내만의 어느 지역에서 축적 또는 희석, 확산될 가능성이 높은지에 관한 연구와 영양염의 섭취율이나 재생율에 대한 내만 내 분포에 관한 연구는 드문 실정이다. 이러한 결과는 육상 오염원의 해역으로의 배출지역 선정이나 양식장의 위치 선정 등에도 참고할 수 있으며, 이를 위해서는 생태-유체역학모형(eco-hydrodynamic model)이 유용한 수단이 될 수 있다. 본 연구에서는 가막만의 영양염 거동 특성을 파악하기 위하여 조^{3,4)} 등에 의하여 가막만에 대한 적용성이 검토된 생태-유체역학모형을 사용하였다.

시뮬레이션 결과의 영양염 현존량이 결정되기까지의 과정 중 이류와 확산작용에 의한 물리과정량을 산정하였으며, 이를 바탕으로 만 내의 어떤 지역

Corresponding Author : Dong-Myung Kim, Research Center for Environmental Risk, The National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 305-8506, Japan
Phone : +81-29-850-2943
E-mail : dmk5260@chol.com

에서 오염물질의 축적현상이 일어나는지를 파악하였다. 또한 지역적 분포에 따른 영양염의 순섭취율 또는 순재생율을 산정하여, 수질관리 방안의 선택을 위한 시나리오 분석의 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상해역

대상해역인 가막만은 여수반도 남단과 돌산도에 둘러싸인 남북방향 15km, 동서방향 9km의 타원형의 내만이다. 평균 수심은 약 9m이며 해수면 하 용적은 $10.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 면적은 147.5 km^2 이다³⁾.

2.2. 영양염 시뮬레이션

본 연구에서 사용된 생태-유체역학 모델(eco-hydrodynamic model)은 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층 모델(COSMOS)⁹⁾과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델(EUTRP2)^{8,10)}로 구성되어 있으며, 이것은 김¹⁾, 김²⁾, 조³⁾, 최⁶⁾ 등에 의하여 연구 개량되어 국내 연안에의 적용성이 검토된 모델이다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} \\ & \text{조석류 또는 잔차류에 의해서 운반되는} \\ & \text{(이류)효과를 나타내는 항} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right] \\ & \text{난류확산(혼합)을 나타내는 항} \\ & + \frac{dB}{dt} \\ & \text{생물·화학적인 모든 과정을 포함하는 항 (1)} \end{aligned}$$

식 (1)에서 생물·화학적인 과정을 포함하는 항을 제외한 부분은 이류와 확산에 의해서 대상물질이 물리적으로 이송, 확산되는 현상을 표현하며, 이를 대상물질의 물리과정량^{10~12)}이라 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.

식 (1)에서 물리과정량 부분을 제외한 생물·화학적 과정 부분을 영양염에 관하여 나타내면 식 (2)와 같아진다. 모델 내 각 cell에서 생물·화학적으로

영양염의 농도를 감소시키는 항으로는 식물플랑크톤의 섭취가 있다. 영양염의 재생성을 통한 농도 증가의 항으로는 호흡, 배설, 무기화 등이 있다. 각 cell에서의 영양염 섭취항과 재생항의 차를 구하여 순섭취 또는 순재생을 계산하였다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{d(N,P)}{dt} \right) = & - [(N,P) : C_P] \\ & \cdot v_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP, DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot P \\ & \text{식물플랑크톤에 의한 섭취} \\ & + [(N,P) : C_{\text{POM}}] \frac{1}{1+k} v_6(T) \cdot \text{POC} \\ & \text{식물플랑크톤의 호흡} \\ & + [(N,P) : C_P] \cdot v_2(T) \cdot P \\ & \text{동물플랑크톤의 배설} \\ & + [(N,P) : C_Z] (\mu - v) \cdot v_3(T) \cdot Z \\ & \text{현탁유기물의 분해} \\ & + [(N,P) : C_{\text{DOM}}] \cdot v_7(T) \cdot \text{DOC} \\ & \text{용존유기물의 무기화} \\ & + q_{(N,P)} \\ & \text{계외로부터 공급} \quad (2) \end{aligned}$$

2.3. 입력자료

대상해역은 동서 및 남북방향으로 각각 250m로 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 생물파라메타의 기호, 정의, 단위 및 적용값은 기존의 연구^{3,5,7)}에서 산정된 값을 이용하였다. 해수유동모델에 의한 가막만의 유동 특성은 환경부⁷⁾의 연구에서 적용된 결과를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

생태계 시뮬레이션 결과가 실제 가막만의 수질을 잘 재현하는지 검토하기 위하여 2001년 하계의 실측치와 비교하였다. 용존무기질소와 용존무기인 농도의 계산치와 관측치를 비교한 결과 용존무기질소의 상대오차는 평균 25.8%, 용존무기인의 상대오차는 평균 14.3%로 양호한 적용성을 나타내었다.

3.1. 물리과정량

생태계 모델을 이용한 용존무기질소와 용존무기인의 층별 물리과정량 계산결과를 Fig. 1 과 Fig. 2에 나타내었다. 이류 및 확산에 의한 영양염의 유입량이 유출량보다 많아 축적현상이 일어나는 지역은 검은색으로 표시하였으며, 유출량이 유입량보다 많

생태계모형을 이용한 가막만의 영양염 거동 특성 평가

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 7)							
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 (cm ² /s)							
Horizontal diffusion coefficient		1.0 E5 (cm ² /s)							
Vertical diffusion coefficient		Level 1~3 : 0.1 (cm ² /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 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 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

Table 2. Continued

No.	Symbol	Definition	Unit	Input values
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^1_{DO}	Half concentration of DO for mineralization of POC	mg/L	1.0
19	K^2_{DO}	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	K_a	Reaeration coefficient at sea surface	day ⁻¹	0.25

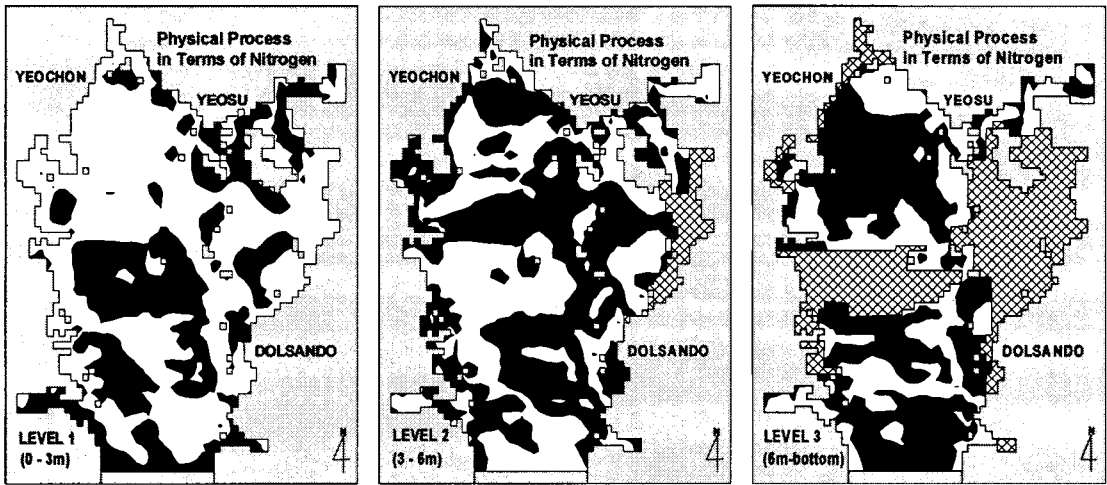


Fig. 1. Distribution of the simulated physical process in terms of nitrogen at each level in the model area. Filled area, accumulation; blanked area, transportation; area of oblique line, sediment.

아 cell로의 이송현상이 나타나는 지역은 흰색으로 표시하였다. 중층과 저층의 경우는 지역에 따라 각각 3m 및 6m 미만의 수심을 가지는 곳이 있게 되는데, 이러한 지역은 사선으로 나타내었다.

용존무기질소의 경우, 표층에서는 물리과정량이 만 중앙 일부에서는 양의 값을 나타내어 축적현상이, 그 외의 지역에서는 음의 값을 나타내어 이송현상이 탁월한 것으로 나타났다. 저층의 경우는 전반적으로 유입량이 유출량보다 큰 것으로 나타나 축적현상이 주로 일어나는 것으로 평가되었다. 중층의 경우는 축적현상과 이송현상이 일어나는 지역의 크기가 비슷하게 나타났으며, 그 분포는 표층과 반대

의 경향을 나타내었다. 용존무기질의 경우도 지역적인 미소한 차이를 제외하고는 용존무기질소와 같은 경향을 나타내었다. 층별로는 표층에서 이송현상이 탁월하게 나타났으며, 저층으로 갈수록 축적현상이 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2. 영양염의 섭취 및 재생

생태계 모델내 각 cell에서의 영양염 섭취량과 재생량의 차를 구하여 계산한 층별 영양염 순섭취율 또는 순재생율의 결과를 Fig. 3 과 Fig. 4에 나타내었다. 식 (2)에 의하여, 음의 값을 가지는 지역은 순섭취가 일어나는 지역이며, 양의 값을 가지는 지역

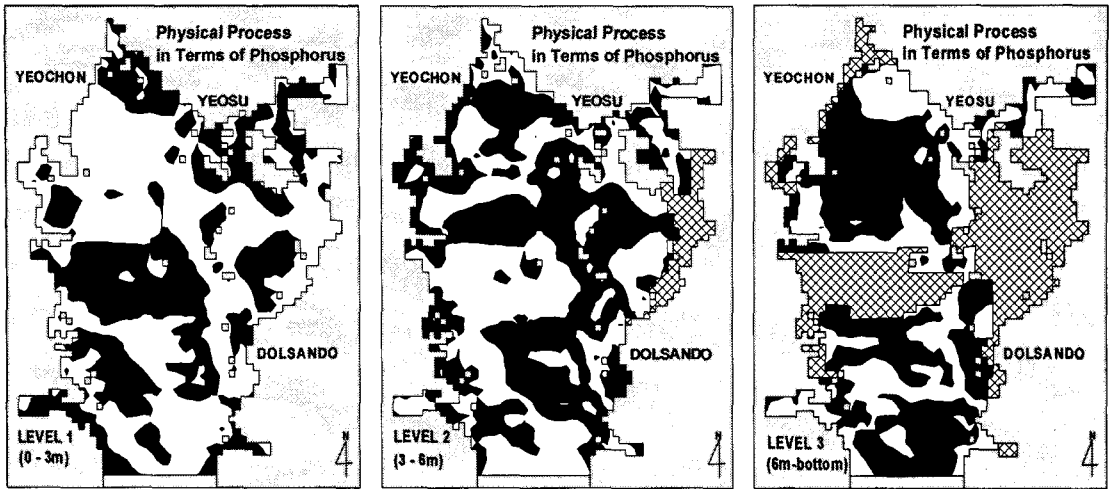


Fig. 2. Distribution of the simulated physical process in terms of phosphorus at each level in the model area. Filled area, accumulation; blanked area, transportation; area of oblique line, sediment.

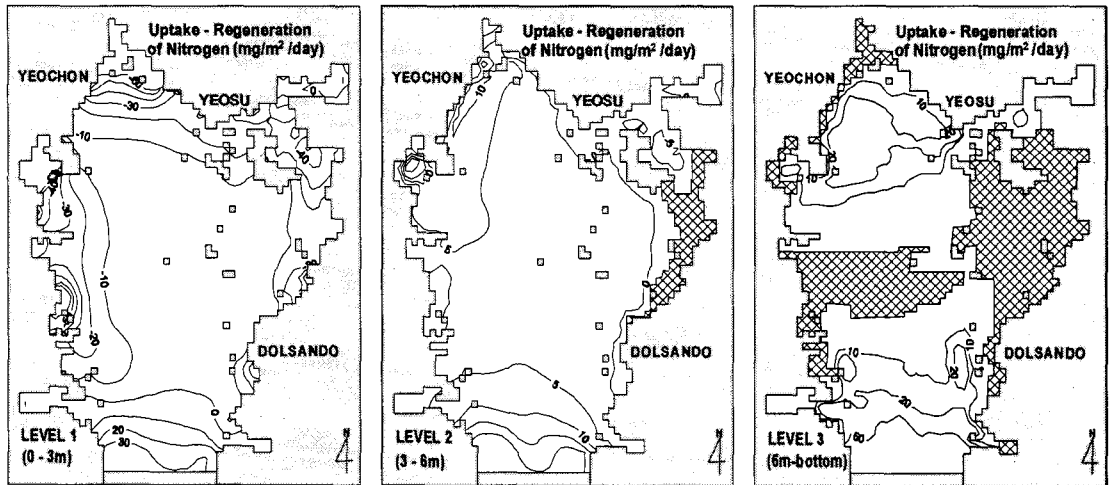


Fig. 3. Distribution of the simulated rate of the uptake and regeneration of nitrogen at each level in the model area. Negative value, net uptake; positive value, net regeneration; area of oblique line, sediment.

은 순재생이 일어나는 지역을 나타낸다. 물리과정량과 마찬가지로 중층과 저층의 수심이 낮은 지역은 사선으로 나타내었다.

용존무기질소의 경우, 표층에서는 만 입구를 제외한 대부분의 지역에서 순섭취가 일어났다. 순섭취율의 크기는 연안에서는 $20\text{mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 값을 보였으며, $60\text{mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 높은 값을 나타내는 지역도 나타났다. 만 중앙부의 경우는 순섭취율이 $0.5\text{mg/m}^2/\text{day}$ 정도로 나타났다. 중층의 경우는 여수와 여천항 인근을 제외한 대부분의 지역에서 순재생이 일어났으며, 그 크기는 만 중앙부에서는 $0\sim 5\text{mg/m}^2/\text{day}$, 만 입구측에서는 $10\text{mg/m}^2/\text{day}$ 이상의

값을 나타내었다. 저층에서는 전 지역에서 순재생이 일어났으며, 대부분의 지역에서 $10\text{mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 값을 나타내었다.

용존무기인의 경우, 표층에서는 연안을 따라 순섭취가 일어났으며, 만 대부분의 지역에서 $0.0\sim 3.0\text{mg/m}^2/\text{day}$ 정도의 순재생이 일어났다. 중층과 저층의 경우는 만 전역에서 순재생이 일어났으며, 그 크기는 중층의 경우는 $0.5\sim 1.5\text{mg/m}^2/\text{day}$, 저층의 경우는 $1.0\sim 3.0\text{mg/m}^2/\text{day}$ 의 분포를 나타내었다.

이상에서와 같이 가막만에서의 영양염의 순섭취는 주로 표층에서 일어났는데, 특히 용존무기인의 경우는 표층의 연안부분에서 순섭취를 나타내었으

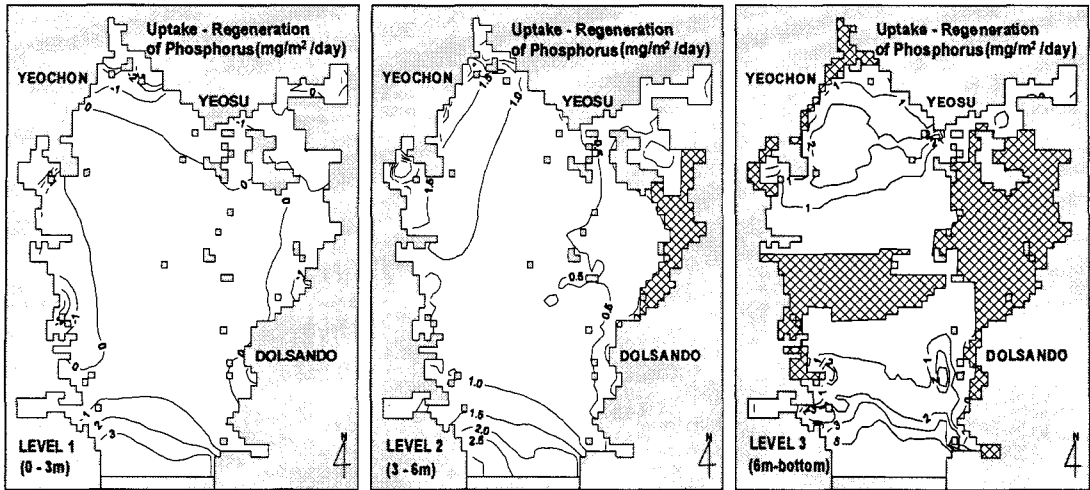


Fig. 4. Distribution of the simulated rate of the uptake and regeneration of phosphorus at each level in the model area. Negative value, net uptake; positive value, net regeneration; area of oblique line, sediment.

며, 그 이외의 지역에서는 영양염의 순재생이 탁월한 것으로 나타났다.

4. 결 론

생태-유체역학모델을 이용하여 가막만에 대한 영양염의 물리과정량 및 순섭취 또는 재생율을 산정하여, 수질관리 방안의 선택을 위한 시나리오 분석의 자료로 제공하였다.

가막만의 용존무기질소 및 용존무기인의 물리과정량 산정 결과 표층에서는 중앙 일부를 제외한 지역에서 이송현상이 탁월한 것으로 나타났으며, 저층으로 갈수록 축적현상이 일어나는 지역이 증가하는 경향을 나타내었다.

용존무기질소의 경우, 표층에서는 대부분의 지역에서 $0\sim 60\text{mg/m}^2/\text{day}$ 정도의 순섭취를 나타내었으며, 중층의 경우는 여수와 여천항 인근을 제외한 대부분의 지역에서 $0\sim 10\text{mg/m}^2/\text{day}$ 의 순재생을 나타내었다. 저층에서는 전 지역에서 순재생이 일어났으며, 대부분의 지역에서 $10\text{mg/m}^2/\text{day}$ 이상의 값을 나타내었다.

용존무기인의 경우, 표층에서는 만 대부분의 지역에서 $0.0\sim 3.0\text{mg/m}^2/\text{day}$ 정도의 순재생이 일어났다. 중층과 저층의 경우는 만 전역에서 각각 $0.5\sim 1.5\text{mg/m}^2/\text{day}$ 및 $1.0\sim 3.0\text{mg/m}^2/\text{day}$ 의 순재생을 나타내었다.

이상의 결과에서 보면 가막만의 경우 표층에서는 주로 이송현상이 일어났으며, 저층에서는 축적현상이 일어났다. 영양염의 순섭취는 주로 표층에서 일어났으며, 저층으로 갈수록 순재생율이 높아짐을 알 수 있었다. 따라서 표층에서 유입되어 저층으로 이

동된 오염물질들은 외해로 희석·확산되지 않고 가막만의 오염을 가중시킬 가능성이 높은 것으로 보인다. 이에 표층을 통한 영양염의 유입뿐만 아니라 저층의 재생산에 의한 영양염 공급에 대해 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 김광수, 김동명, 박청길, 1999, 3차원 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략산정, 한국해양환경공학회지, 2(1), 63-73.
- 2) 김종구, 김양수, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용 2. 오염부하의 정량적 관리, 한국수산학회지, 35(4), 356-365.
- 3) 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 가막만의 환경용량 산정(I) - 생태계모델을 이용한 기초생산력 산정, 한국수산학회지, 29(3), 369-385.
- 4) 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 가막만의 환경용량 산정(II) - 굴 양식장 환경용량 산정, 한국수산학회지, 29(5), 709-715.
- 5) 조은일, 1996, 생태계모델을 이용한 어장환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 119pp.
- 6) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 27(4), 414-433.
- 7) 환경부, 2000, 해산어 육상축양장의 수질개선 및 연안환경 개선을 위한 오존처리 시스템의 개발, 123pp.
- 8) Nakata, T. K., 1991, A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay,

생태계모델을 이용한 가막만의 영양염 거동 특성 평가

- KAIKOU, 5(2), 1-26.
- 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) 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, 80pp.
- 11) 김동명, 1999, 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 부경대학교 대학원 박사학위논문, 143pp.
- 12) 이대인, 김동명, 김형철, 이석모, 박청길, 2000, 낙동강 하구해역의 식물플랑크톤 극대역 변동에 관한 수치시물레이션 - II. 식물플랑크톤 극대역 변동의 수치시물레이션, 한국환경과학회지, 9(5), 375-383.