

수영만의 생태계모델링에 의한 물질분포

김 동 선 · 조 규 대*
부경대학교 해양산업개발연구소 · 부경대학교 해양학과
(1998년 7월 6일 접수)

The Material Distribution by the Ecosystem Modeling in Suyoung Bay

Dong-Sun Kim and Kyu-Dae Cho*

Research Center for Ocean Industrial Development(RCOID) Pukyong National University, Pusan 608-011, Korea
*Dept of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737 Korea
(Manuscript received 6 July 1998)

A three-dimensional ecosystem model is applied to the Suyoung Bay, located at the southeastern part of Korea, to study of the material distribution in the time scale of several tens days. The model has included of the DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen), DIP(Dissolved Inorganic Phosphate), phytoplankton, zooplankton and detritus, and also was coupled with the physical processes. The spatial distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the model is determined by the physical and chemical-biological parameters. The horizontal distributions of the DIN, DIP and chlorophyll-a are decreased from the coast to the off-shore, though the nutrients show some more complicated pattern than the chlorophyll-a. The nutrient contents in the off-shore are low, and thus a relatively low productivity(chlorophyll-a) are presented. On the whole, the distribution of the results of model are smoother than the observed ones and some small scale variation in the observed data cannot be reproduced by the model due to the resolution limits of model. However, the basic pattern and the quantitivities has been reproduced by the model well.

Key words : material distribution, ecosystem modelling

1. 서 론

연안해역은 육지로부터 유입되는 여러가지 물질과 해양의 물질이 서로 만나기 때문에 생·화학적으로 다양한 반응이 일어나고 있는 지역이다. 따라서, 연안해역에서 어떠한 물질이 어떠한 과정을 통하여 얼마나 외양에 공급되고 있는지를 정량적으로 규명할 필요성이 있다.

조류가 탁월한 연안해역에 순간적으로 투입된 보존물질은 시간의 경과에 따라 왕복운동의 성질을 가진 조류(tidal current)와 일정한 방향성을 가지고 움직이는 잔차류(residual flow)가 중첩되어 분산하면서 잔차류에 의해 물질이 퍼져나간다. 이러한 물질수송의 이미지는 염분과 같이 성질이 변하지 않는 보존성물질의 경우이나, 강이나 하천을 통하여 육상으로부터 유입되는 질소(nitrogen)나 인(phosphorus)등과 같은 영양염인 비보존성물질은 생·화학적인 변화에 따라서 그 물질의 농도가 변화한다. 그러므로 수십일이상의 시간크기를 가지고 있는 연안역에서 이들에 대한 정확한 물질분포를 알기 위해서는 조석잔차류(tide induced residual current), 밀도류(density-driven current), 취송류(wind-

driven current)로 구성된 잔차류(residual flow)에 의한 유동의 계산과 더불어 물질의 생·화학적인 과정을 고려한 물질분포를 밝혀야 한다.

해양생태계모델은 Steel(1962)을 시작으로 많은 연구가 진척되었다. 최근에는 이에대한 기초적인 연구(Kremer and Nixon, 1978; Fasham et al., 1990), 만에서의 수질에 대한 연구(Nakata, 1993)와 오염된 만에서의 운영기법에 대한 연구(Yanagi et al., 1997) 등의 수많은 생태계모델에 대한 연구가 행해지고 있는 실정이다. 이런 연구들은 생태계모델을 통한 모의실험으로써 자연계의 생태계구조를 어느정도의 정확도로 실제상황에 근접하게 표현할 수 있는가에 초점을 두고 있다.

본 연구해역인 수영만은 수영강으로부터 유입하는 생활하수 및 공장폐수로 인하여 직접적으로 육상으로부터의 오염물질이 증가하고 있는 지역이다. 또한, 수영만의 바깥쪽은 외해수와 접하고 있기 때문에 해수유동 및 오염물질의 확산에 관한 연구가 중요한 과제로 되어 있는 지역이다. 따라서 본 연구의 목적은 한국 남동연안에 위치한 수영만(Fig.1)에서 수온, 염분 및 바람의 관측자료

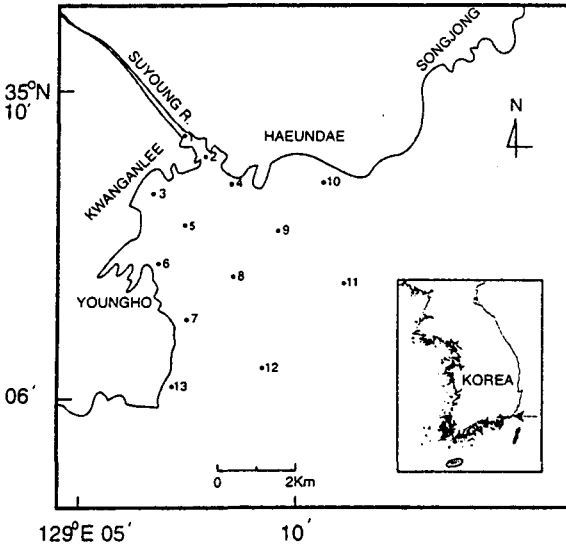


Fig. 1. The oceanographic observation points in the Suyoung Bay.

에 의한 3차원 robust진단모델로써 잔차류(residual flow)를 계산하여 DIN (dissolved inorganic nitrogen), DIP(dissolved inorganic phosphate), chlorophyll-a, 동물플랑크톤 및 detritus를 포함한 생태계모델을 계산하여 현장의 물질분포를 재현하는데 있다.

2. 물질의 변화과정

단위체적당(C g cm⁻³) 물질농도의 시간에 따른 변화량을 다음과 같은 이류·확산방정식(1)에 의해 나타내었다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -(u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial C}{\partial z}) + P(C) - D(C) - S(C) + C_0 \quad (1)$$

여기서, C는 물질의 농도, u, v, w는 각각 잔차류(residual flow)의 x(eastward), y(northward) 그리고 z (upward from the mean sea surface)성분을 나타내고 있다. 또한 t는 시간, K_x, K_y 그리고 K_z는 각각 x, y 그리고 z방향의 확산계수로 식(2)와 (3)으로 표시하였다.

$$K_x = \frac{\alpha}{\pi} U_m^2 T, \quad K_y = \frac{\alpha}{\pi} V_m^2 T \quad (2)$$

여기서 U_m 과 V_m 는 M₂ 조류의 x 와 y 방향의 성분 그리고 T는 주기를 나타내고 있으며, α(0<α<1.0)는 1조석 주기동안의 물의 혼합비를 나타낸다.

$$K_z = \frac{K_0}{(1+b Ri)^\beta} + K_b \quad (3)$$

여기서 K₀(=5 cm²s⁻¹)는 중립상태에서의 연직적 난류 확산계수, K_b(=0.5 cm²s⁻¹)는 연직적 확산계수의 배경, b (~=3.33)과 β(=1.5)는 임의상수, Ri는 Richardson number(Munk and Anderson, 1948)로 식(4)로 표시한다.

$$Ri = \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho V_s} \quad (4)$$

여기서 V_s는 연직기울기의 제곱으로 식(5)와 같이 수식화 하였다.

$$V_s = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U^*}{k(z+h)} + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

여기서 U* = γ_b²(u²+v²)^{1/2}는 조류의 마찰속도, γ_b²는 해저마찰계수, κ=0.41는 von Karman 상수, u 와 v는 각각 x와 y방향의 잔차류(residual flow)성분, h는 수심을 나타내고 있다.

또한 식(1)에서의 P는 물질의 생화학적인 생산율, D는 물질의 생화학적인 분해율, S는 부유물질의 침강속도(S=0 이면 용존물질) 그리고 C₀는 물질의 유입량을 표시하고 있다.

3. 물리적과정

3.1 현장관측

수온 과 염분은 1994년 2월에 수영만(Fig. 1)에서 관측한 자료를 이용하였고, 밀도는 수온과 염분의 관측치로부터 계산하였다. Fig. 2는 수온, 염분 및 밀도의 표층, 중층과 저층에서의 수평분포도를 나타낸 것이다. 수온의 분포를 보면 만의 안쪽이 바깥쪽인 외만보다 고수온이며, 염분은 만의 안쪽에서는 저염분, 만의 바깥쪽에서는 고염분의 분포를 나타내고 있다. 또한 수온과 염분 값으로부터 계산한 밀도의 분포를 보면 표층에서는 만의 안쪽이 바깥쪽에 비해 저밀도의 분포를 보이고 있고, 중층과 저층에서의 밀도분포는 만의 안쪽과 바깥쪽의 밀도차가 거의 나타나지 않고 있다.

3.2 수치계산

3차원 진단모델을 이용하여 조석, 밀도의 기울기와 바람의 효과를 고려하여 잔차류(residual flow)를 계산했다. 수치계산의 계산격자는 수평적으로 0.2km의 정방격자, 연직적으로는 표층을 0~5m, 중층을 5~20m 그리고 저층을 20m~bottom의 3층으로 분할하여 각층의 잔차류를 계산하였다.

해수는 비압축성유체라는 가정하에 전통적인근사, 정수압근사, Boussinesq가정 등을 적용한 운동방정식(6-7), 정수압방정식(8-9), 연속방정식(10) 그리고 수온과 염분의 이류·확산방정식(11-12)을 다음과 같이 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + F_x \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_x \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + F_y \quad (7)$$

$$P = \rho_0 g \eta + \int_{-h}^{\eta} B dz \quad (8)$$

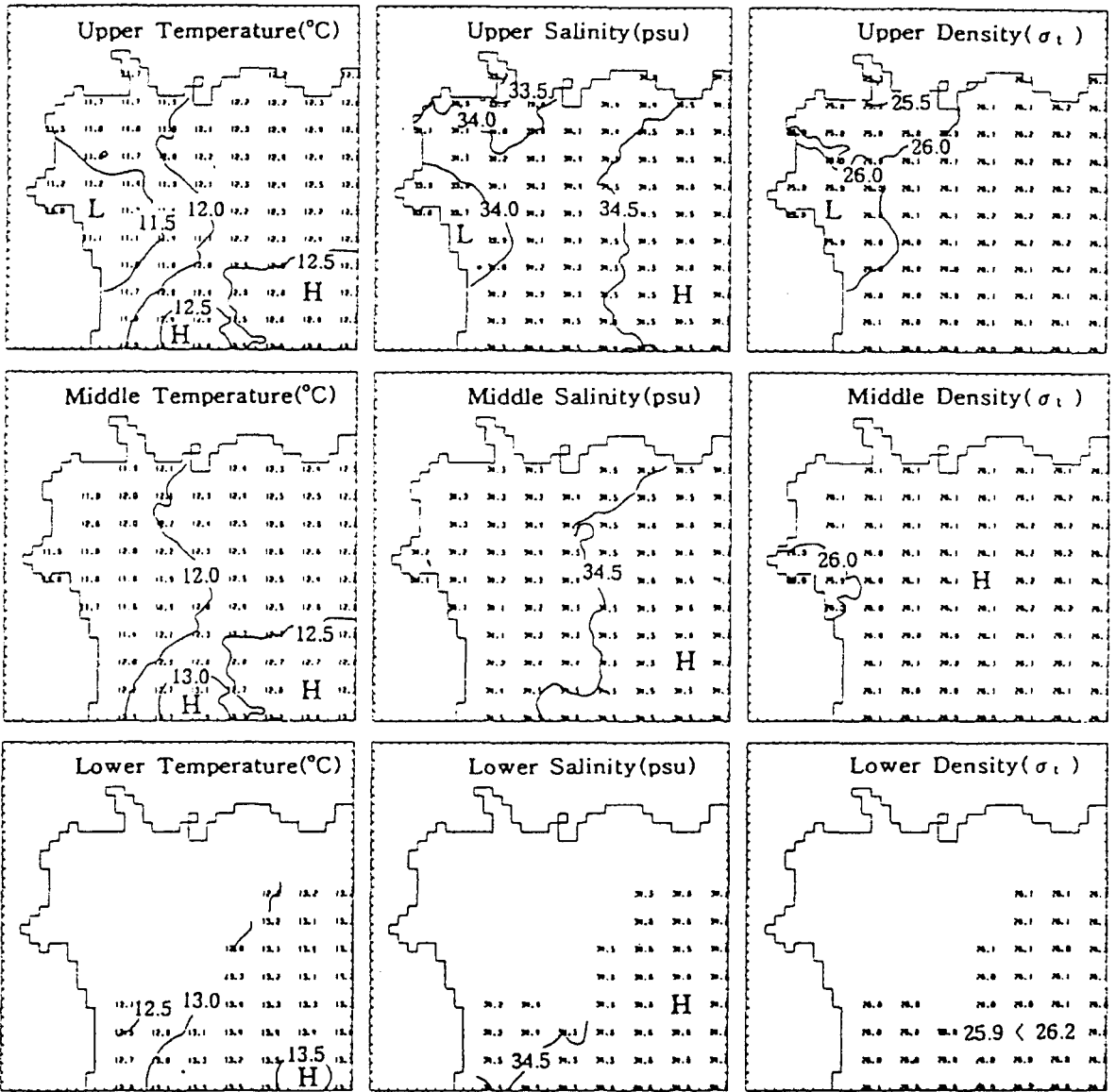


Fig. 2. Horizontal distributions of temperature, salinity and sigma-t in the upper layer(top), middle layer (middle) and lower layer(bottom) of the February of 1994.

$$B = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} g \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = K_h (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \gamma(T^* - T) \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z}) = K_h (\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2}) + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \gamma(S^* - S) \quad (12)$$

$$\rho = H(T, S) \quad (13)$$

여기서 동쪽방향을 x , 북쪽을 y , 해면을 기준으로 연직 상방향을 z 방향으로한 오른손 직교 좌표계를 고려하였다. u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속 성분, f 는 편향력($f=2\omega \sin\psi$; ω 는 지구 자전 각속도, ψ 는 위도 35°), g 는 중력 가속도($=980 \text{ cm/s}^2$), t 는 시간, A_h 와 K_h 는 각각 연직적 난류점성 및 확산계수, A_v 와 K_v 는 각각 수평적 난류점성 및 확산계수, ρ_0 는 평균밀도, ρ 는 현장 밀도, P 는 압력, $H(T, S)$ 는 비선형상태식을 나타내고 있다. 식(6)과 (7)식에서 F_x, F_y 는 조석응력(tidal stress)항으로 (14)와 (15)식(Yanagi and Yamamoto, 1993)과

Table 1. Parameters used in this ecosystem model and their references

Symbol	Definitions	Values	Reference
S _P	Sinking velocity of phytoplankton	33 (cm/s)	Smayda(1970)
S _D	Sinking velocity of detritus	200 (cm/s)	
R _{CZ}	Conversion ratio of concentration of phytoplankton to that of zooplankton	0.75	
R _{NC}	Conversion ratio of concentration of DIN to that of phytoplankton	0.67	
R _{NZD}	Conversion ratio of concentration of DIN to that of zooplankton or detritus	0.52	
R _{PC}	Conversion ratio of concentration of DIP to that of phytoplankton	0.042	
R _{PZD}	Conversion ratio of concentration of DIP to that of zooplankton or detritus	0.032	
R _{DC}	Conversion ratio of concentration of detritus to that of phytoplankton	1.31	
V _m	Maximum photosynthetic rate	1.5 (day ⁻¹)	
K _{SN}	Half saturation constant for nitrogen	11.4 (μM)	Nishijima(1990)
K _{SP}	Half saturation constant for phosphorus	1.0 (μM)	Nishijima(1990)
I _{OPT}	Optimum light intensity for phytoplankton	2.4 (cal/cm ² /day)	McAllister <i>et al.</i> (1964)
I _{SUR}	Maximum light intensity on sea surface	8.64 (cal/cm ² /day)	Kishi <i>et al.</i> (1981)
T _{OPT}	Optimum temperature for phytoplankton	25 (°C)	Yamaguchi(1991)
S _{OPT}	Optimum salinity for phytoplankton	30 (psu)	Yamaguchi(1991)
A ₂	Natural death rate of phytoplankton	0.33 (day ⁻¹)	
R _{max}	Maximum grazing rate of zooplankton	1.5 (day ⁻¹)	
λ	Lvlev constant	0.47 (μgChl.a/l) ⁻¹	Smayda(1973)
P [*]	Threshold of phytoplankton in grazing	0.28 (μgChl.a/l)	McAllister(1970)
A ₄	Natural death rate of zooplankton	0.1 (day ⁻¹)	
ι	Excretion coefficient of zooplankton	0.2	Butler <i>et al.</i> (1969)
χ	Urine coefficient of zooplankton	0.3	
A ₇	Bacteria decomposition rate of detritus	0.25 (day ⁻¹)	

같이 계산하였다.

$$F_x = - (u^* \frac{\partial u^*}{\partial x} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y}) \quad (14)$$

$$F_y = - (u^* \frac{\partial v^*}{\partial x} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y}) \quad (15)$$

여기서, u*, v* 는 각각 M₂ 조류의 x, y 성분을 나타내고 있으며, (14)과 (15)식에서 ()는 1조석주기의 평균을 의미한다.

(6) 와 (7)식의 마지막항은 γ항이라고 하는데, 이것은 Sarmiento and Bryan(1982)에 의하여 도입된 항으로

써 관측한 수온, 염분(T*, S*)과 계산한 수온, 염분(T, S) 값과의 편차를 방지하기 위해서 도입한 항이다. 즉, γ가 크면 관측값에 제한되어 순수한 진단 모델이 되고, γ가 작을 경우 관측값과는 독립된 결과를 가져오는 예보 모델이 된다(Fujio and Imasato, 1991). 본 계산에서는 수온과 염분의 관측값에 의한 유동계산이므로 진단모델로써 γ (0.5/Δ, Δ: 계산의 시간간격) 값을 적용하였다. 계산의 시간간격 Δ는 C-F-L조건에 의해 5초로 하였으며, 수온과 염분에 의한 밀도 분포에 따라 흐름이 생기도록 하였다. 본 모델에서의 해면의 승강에 대해서는

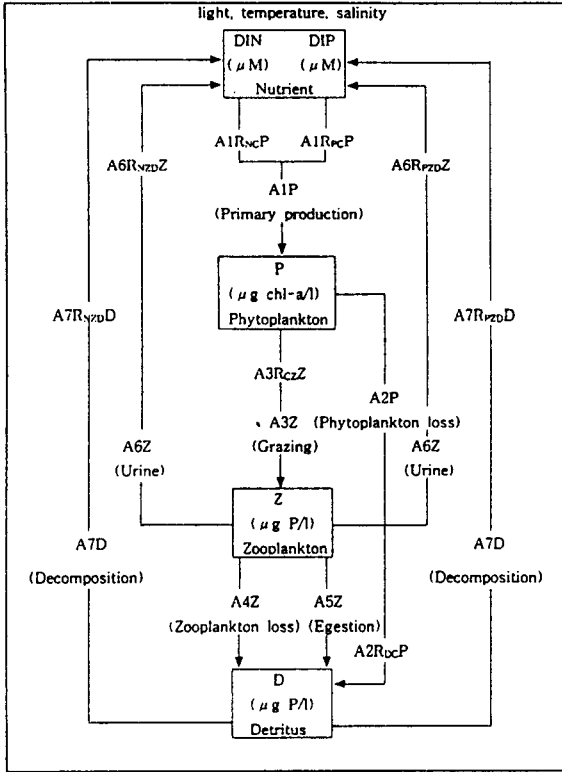


Fig. 3. Interaction among the compartments in the ecosystem model.

semi-implicit scheme을 적용하였다(Backhaus, 1983).

해수면에서의 바람응력과 열수송은 다음과 같이 식 (16)-(19)을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \quad (16)$$

$$\rho_0 A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (17)$$

$$\rho_0 A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (18)$$

$$-K_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_s}{C_p \rho_0}, \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

여기서 ζ 는 평균해수면으로부터의 해수면고도, W_x 와 W_y 는 각각 바람의 x와 y 성분, ρ_a 공기의 밀도, Q_s 는 해수면의 열유량(+:heating, -:cooling) 그리고 C_p 는 일정한 기압에서의 해수의 비열을 나타내고 있다.

해저($z=-h$)에서의 해저항력은 (20), (21)식으로 표시하였다.

$$A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (20)$$

$$A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_b^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (21)$$

조석잔차류(tide-induced residual current)는 (14)와 (15)식, 취송류(wind-driven current)는 (17)와 (18)식, 밀도류(density-driven current)는 (6)과 (7)식의 압력기울기항에 의하여 발생한다. 연안조건으로는 흐름이 경계를 가로지르지 못하도록 하였으며, 경계면에서 경계에 평행한 성분은 non-slip condition을 적용하였다. Open boundary에서는 수온과 염분의 변화가 없도록 하였다.

4. 생·화학적과정

연안해역에서의 간단한 물질순환을 Fig. 3과 같이 나타내었고, 생태계모델에 사용한 매계변수는 Table 1과 같은 값을 이용하여 계산하였다.

4.1 식물플랑크톤의 성장속도에 대한 매계변수화

식(1)의 오른쪽에서 증가하는 항으로써 P(C)는 광합성 활동을 고려한 항이다. 광합성활동은 물의 수온, 염분, 빛의 광도 그리고 영양염 농도에 관한 제한인자로 식 (22)과 같이 수식화하였다. 우선 영양염농도에 관한 제한인자로서는 리비히의 최소량의 법칙을 이용하여 식 (23), (24)와 같이 수식화 하였다.

$$A1 = V_m \cdot \text{MIN}\{V1(N_N), V1(N_P)\} \cdot V2(I) \cdot V3(T) \cdot V4(S) \quad (22)$$

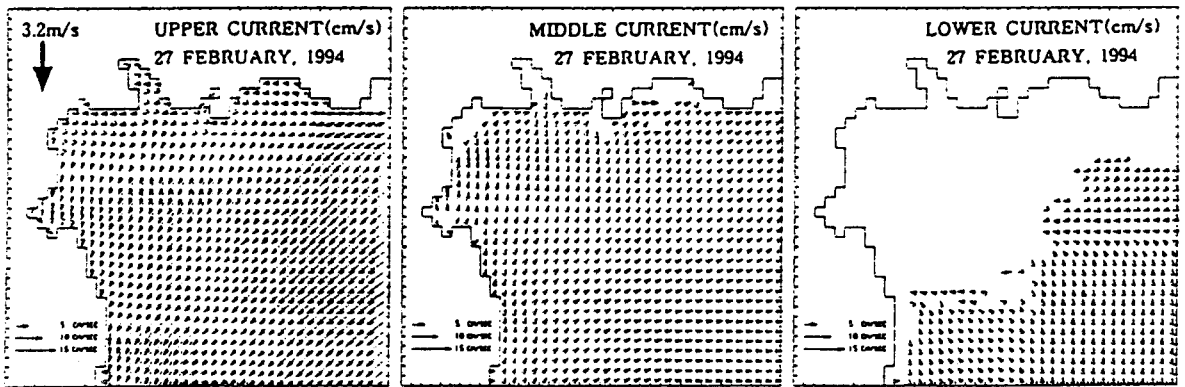


Fig. 4. Computed residual flows in the upper layer(left), middle layer(center) and lower layer(right) of February, 1994. (thick vector in the upper layer: wind speed and direction).

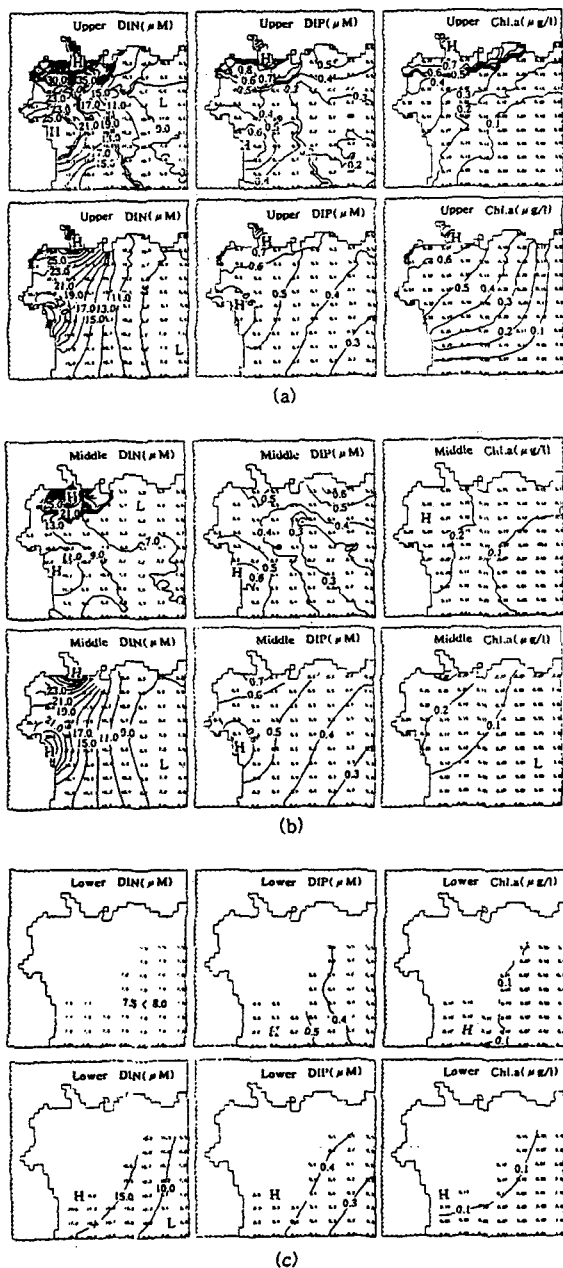


Fig. 5. The comparison between the observation (upper panels) and the model(lower panels) of DIN(μM), DIP(μM), and Chlorophyll-a(μg/l) in the upper layer(a), middle layer(b), and lower layer(c).

$$V1(N_N) = \frac{N_N}{K_{SN} + N_N} \quad (23)$$

$$V1(N_P) = \frac{N_P}{K_{SP} + N_P} \quad (24)$$

여기서, V_m 는 식물플랑크톤의 최대성장속도, K_{SN} , K_{SP} 는 각각 질소와 인에 관계하는 반포화정수를 나타내

고 있다. 또한 성장속도가 최대값의 1/2가되는 영양염 농도상에서의 반포화정수는 Nishijima et al.(1990)의 AGP(algal growth potential)실험에서 구한값으로 각각 11.4μM, 1μM을 사용했다. 또한, 식물플랑크톤의 빛에 대한 영향은 (25)식을 이용하였다.

$$V2(I) = \frac{I}{I_{OPT}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{OPT}}\right) \quad (25)$$

$$I = I_s \exp(-kd)$$

여기서 I는 빛의 량, I_{OPT} 는 빛의 최적량, I_s 는 해면광량, k 는 빛의 소산계수(=0.7) 그리고 d 는 수심을 나타내고 있다. 빛의 최적량은 McAllister et al.(1964)의 실내실험으로부터 얻은 포화광량 2.4 cal cm⁻² day⁻¹으로 하였으며, 해면광량은 Kishi et al.(1981)이 일본기상청에서 관측한 하계조도(=60 klux)을 단위시간, 단위면적당의 에너지로 환산하여 8.64 cal cm⁻² day⁻¹ 값을 취하였다.

그리고 식물플랑크톤의 수온과 염분에 기인하는 성장속도는 James and Ralph(1980)의 곡선형 관수에 따라 (26), (27)식을 사용하였다.

$$V3(T) = \frac{T_{EM}}{T_{OPT}} \exp\left(1 - \frac{T_{EM}}{T_{OPT}}\right) \quad (26)$$

$$V4(S) = \frac{S}{S_{OPT}} \exp\left(1 - \frac{S}{S_{OPT}}\right) \quad (27)$$

여기서 T_{EM} 는 수온의 관측치, T_{OPT} 는 최적수온, S는 염분의 관측치 그리고 S_{OPT} 는 최적염분치를 표시한다. 최적수온과 최적염분은 Yamaguchi(1991)의 *Skeletonema costatum*의 배양실험으로부터 얻어진 25℃, 30 psu 를 각각 이용하였다. 식물플랑크톤의 자연취사율(A2)은 식물플랑크톤에 대하여 비례적으로 고려되어야 한다.

4.2 동물플랑크톤의 섭식속도에 대한 매개변수화

동물플랑크톤의 섭식속도는 먹이가 되는 식물플랑크톤의 현존량에 좌우될 것으로 사료된다. 본 연구에서는 식물플랑크톤에 의존하는 Ivlev(1945)의 식을 수정한 Parsons et al.(1967)식을 사용하여 동물플랑크톤의 섭식속도를 (28)식으로 계산했다.

$$A3 = R_{max} \{1 - \exp\lambda(-P + P_c)\} \quad (28)$$

여기서 R_{max} 는 최대섭식속도, λ 는 Ivlev의 정수 그리고 P_c 는 동물플랑크톤이 섭식가능한 chlorophyll-a의 최저농도를 표시하고 있다.

동물플랑크톤의 자연취사율(A4)은 하루에 0.1로 생각하였으며, 동물플랑크톤의 배설속도(A5)는 동물플랑크톤의 섭식속도에 비례하는 식(29)(Conover, 1966)을 이용하였다.

$$A5 = iR_{max} \{1 - \exp\lambda(-P + P_c)\} \quad (29)$$

여기서 i 는 배설계수로써 Butler et al.(1969)의 0.2를 사용했다.

동물플랑크톤의 소변속도는 Corner et al.(1972)의 최대섭식속도에 비례한다고 하는 (30)식을 이용하여 생각했다.

$$A6 = xR_{max} \quad (30)$$

여기서 x 는 소변계수로써 Corner et al.(1972)의 0.

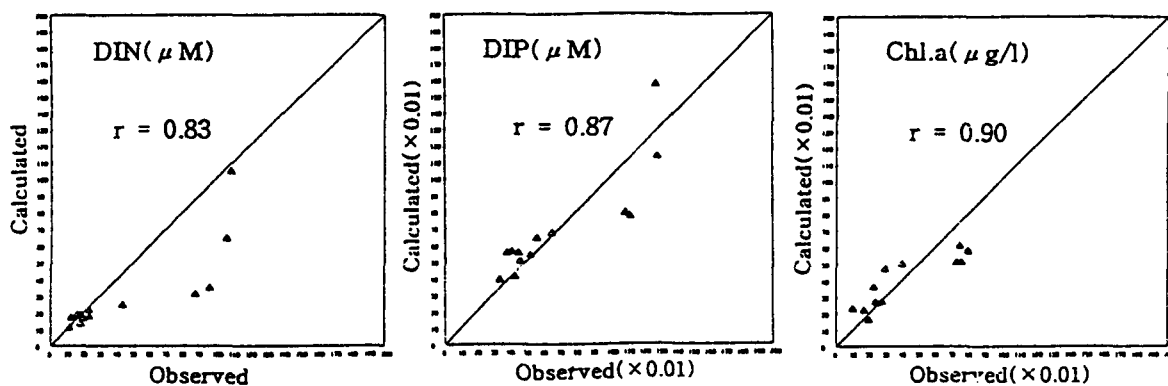


Fig. 6. Comparison between the computed and observed DIN(μM), DIP(μM), and Chlorophyll-a($\mu\text{g/l}$) at observation points.

2~0.4를 참고하였으며 본 연구에서는 0.2의 값을 이용하여 계산했다.

Bacteria에 의한 detritus의 분해량(A7)은 detritus의 농도에 비례한다는 가정 아래에서 A7만이 영양염으로 전환하는 양으로 생각하였다.

따라서 이상과 같은 가정에 의하여 식(22)에서 식(30)을 물질의 순환이 연안에서 폐쇄된 상태에서 식(6)에서 식(21)의 운동·연속방정식과 이류·확산방정식의해서 식(1)에서 동시적으로 계산하여 연안해역에서의 시간에 따른 물질의 변화량을 추정하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig.4는 표층, 중층 및 저층에서 잔차류(residual flow)의 수평분포도를 나타낸것이다. 표층에서의 잔차류에 대한 계산결과를 보면 만 안쪽의 흐름은 대체적으로 남쪽으로, 만의 바깥쪽에서는 바람이 부는 방향의 오른쪽인 남서쪽으로의 유동형태를 보이고 있다. 따라서 표층에서의 잔차류 흐름의 결과는 바람($N 3.2 m s^{-1}$)에 대해 지배적인 흐름의 양상을 띄고 있음을 알 수 있다. 중층에서의 유동은 표층의 흐름에 대한 보류적인 성격의 흐름양상을 나타내고 있다. 즉, 표층에서의 흐름은 만의 안쪽에서 바깥쪽으로 유출하고 있지만, 중층에서는 유입되고 있는 형태를 보이고 있다. 한편, 만 바깥쪽에서는 전반적으로 북동방향으로의 유동을 나타내고 있다. 또한 저층에서의 잔차류의 세기는 표층과 중층에 비하여 미약하며, 유향은 만의 바깥쪽에서 만 중앙부로 흐르는 양상을 나타내고 있다.

DIN, DIP 및 chlorophyll-a에 대한 관측값과 생태계 모델을 이용하여 얻어진 계산결과를 Fig.5에 나타내었다. 계산을 시작하여 90일째의 DIN, DIP 및 chlorophyll-a 결과값을 나타낸 것이다. 관측값의 물질분포를 보면, DIN과 DIP의 주 유입원인 하천, 공장 및 하수처리장 등이 수영만의 안쪽에 위치하고 있으므로 만 안쪽의 표층에서는 각각 $21.0\mu\text{M}$, $0.6\mu\text{M}$ 이상의 고농도역을 보이고 있으며, 이와같은 지역의 고농도가 만의 중앙부까지 나타나 있다. 이 고농도는 만의 바깥쪽으로 갈수록 점점 농도가 낮아지고 있다. 한편, 생태계모델에 의

한 물질분포에서도 만 안쪽에서의 고농도역과 이와같은 고농도가 이류에 의해서 만 중앙부까지 진입하여 퍼져있음을 알 수 있었다. 또한, 계산결과로부터 만의 바깥쪽인 저층에서의 영양염의 저농도역의 재현이 가능하였다. Chlorophyll-a의 관측값과 계산결과 수평분포를 보면, 관측값의 chlorophyll-a농도는 영양염과 빛이 풍부한 표층의 만 안쪽이 $0.6\mu\text{g/l}$ 이상의 고농도역을 보이고 있으며, 이 chlorophyll-a 고농도가 이류에 의하여 만의 안쪽에서 만의 중앙부에 걸쳐 있는 양상을 보여주고 있다. 이와같은 관측값에 의한 chlorophyll-a의 수평분포양상도 생태계모델을 이용하여서 잘 재현 할 수 있었다. 일반적으로 chlorophyll-a는 자기차폐 및 동물플랑크톤에 의한 포식과 detritus의 차폐등으로 빛의 양이 수심이 증가에 따라 감소하여 저광합성으로 인한 중·저층의 감소현상을 나타내고 있다. 이와같은 chlorophyll-a의 수심에 따른 저농도현상도 본 연구에 이용된 물질의 생·화학적 상호관계식의 매계변수(Table 1)에 의한 생태계모델로써 chlorophyll-a가 표층에서 중·저층으로 갈수록 감소하는 연직적인 물질의 분포에 대한 재현이 가능하였다.

또한, 관측값에 대한 생태계 수치실험의 결과가 얼마만큼 현장의 물질분포를 정량적으로 잘 재현하고 있는가를 조사하기 위하여 관측값과 계산값에 대한 상관계수(r)를 Fig.6에 나타내었다. DIN, DIP 및 chlorophyll-a의 상관계수는 각각 0.83, 0.87 및 0.90으로 상당히 높은 값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에 이용한 생태계모델은 현장의 관측값을 잘 나타내고 있는 것으로 밝혀졌다.

연안역에서 부영양화에 의한 식물플랑크톤의 대번식에 가장 큰 영향을 미치는 것은 육상오염원인 하천, 도시하수 및 산업폐수의 부하원으로 알려져있다. 수영만에서도 육지와 인접하고 있는 강하구쪽의 영양염 농도가 높게 분포하고 있으나(Fig. 5), 이와 같은 현상만으로는 부영양화에 따른 적조 등의 발생을 예상할 수는 없는 실정이다. 이것은 계절적특성 즉, 동계(2월)는 영양염의 농도가 높은 반면에 식물플랑크톤의 활성이 낮기 때문에 수영강 하구의 chlorophyll-a의 농도가 약 $0.7\mu\text{g/l}$ 정도

로 해역의 부영양화(평균염록소농도: 약 $\geq 10 \mu g/l$)의 조건에 미치지 못하여 이 지역에서의 부영양화로 인해 발생 가능성이 높은 적조는 일어나지 않고 있다. 또한, 동계(2월) 수염만의 경우 수온이 표층에서 저층에 걸쳐서 약 11.0~13.5℃(Fig. 2) 정도의 분포를 보이고 있으며, 따라서 이와같은 낮은 수온분포는 적조생물의 증식에 부적절한 환경요인이기도 하다. 그러나 외양에 대하여 반복적인 지형을 갖고있는 수영강하구의 주변지역은 하계 육상에서 유입되는 영양염의 농도와 일사량에 비례하여 식물플랑크톤의 대번식이 예상되는 지역이며, 현실적으로 이와같은 연안역에서는 하계의 부영양화가 일어나고 있다.

따라서, 육상에서 대량으로 유입되고 있는 영양염에 의한 식물플랑크톤의 대번식을 본 연구에서 구축한 부영양화와 이류 및 빛의 소산계수를 고려한 생태계모형을 이용함으로써 적조생물에 대한 대량번식의 재현이 가능할 것으로 사료된다. 더욱이, 본 연구에서 사용한 생태계모형을 이용하여 육상오염원인 하천, 공장 및 하수종말처리장으로부터 유입하는 영양염의 부하량을 조절한다면 부영양화를 해소 할 수 있는 하나의 도구로써 사용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단지정 부경대학교 해양산업개발연구소의 Post-Doc. 연수지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Backhaus, J. O.(1983): A semi-implicit scheme for the shallow water equation for application to shelf water sea modeling. *Con. Shelf Res.*, 2, 243-254.

Butler, E. I., E. D. S. Corner and S. M. Marshall (1969): On the nutrition and metabolism of zooplankton VI. Feeding efficiency of *Calanus* in terms of nitrogen and phosphorus. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 49, 977-1001.

Conover, R. J.(1966): Factors affecting the assimilation of organic matter by zooplankton and the question of superfluous feeding. *Limnol. Oceanogr.*, 11, 346-354.

Corner, E. D. S., R. N. Head and C. C. Kilvington (1972): On the nutrition and metabolism of zooplankton VII. The grazing of *Biddulphia* cell by *Calanus helgolandicus*. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 52, 847-861.

Fasham, M. J. R., H. W. Ducklow and S. M. McKelvie(1990): A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer. *Journal of Marine Research*, 48, 591-639.

Fujio, S. and N. Imasato(1991): Diagnostic calculation for circulation and water mass movement in the deep Pacific. *J. Geophys. Res.*,

96, 759-774.

Ivlev, V. S.(1945): The biological productivity of waters. *Usp. Sovrem Biol.*, 19, 98-120.

James, E. C. and T. C. Ralph(1980): Simulation model of *Skeletonema costatum* population dynamics in northern San Francisco Bay, California. *Acadrmic Press Inc. (London) Ltd.*, 83-100.

Kishi, M. J., K. Nakata and K. Ishikawa(1981): Sensitivity analysis of a coastal marine ecosystem. *Journal of Oceanogr.*, 37, 120-134.

Kremer, J. N. and S. W. Nixon(1978): A coastal marine ecosystem. Springer-Verlag, Berlin.

McAllister, C. D., N. Shah and J. D. H. Strickland (1964): Marine phytoplankton photosynthesis as a function of light intensity: a comparison of methods. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 21, 159-181.

McAllister, C. D.(1970): Zooplankton ratios, phytoplankton mortality and the estimation of marine production. In: Steele, J.H.(Ed.), *Marine Food Chains*. California, pp. 419-457.

Munk, W. H. and E. R. Anderson(1948): Note on a theory of the thermocline. *J. Mar. Res.*, 7, 276-295.

Nakata K.(1993): Ecosystem Model; its formulation and estimation method of unknown rate parameters. *J. Adv. Mar. Tec. Conf.*, 8, 99-138 (in Japanese with English abstract and captions).

Nishijima, T., T. Yamato and Y. Hata(1990): AGP test of *Skeletonema*. *Water Pollut. Stud.* 13, 173-179 (in Japanese with English abstract).

Parsons, T. R., R. J. LeBrasseur and J. D. Fulton (1967): Some observations on the dependence of zooplankton grazing on the cell size and concentration of phytoplankton blooms. *Journal of Oceanogr.*, 23, 10-17.

Sarmiento, J. L. and K. Bryan(1982): An ocean transport model for the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 87, 394-408.

Smayda, T. J.(1970): The suspension and sinking of phytoplankton in the sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 8, 353-414.

Smayda, T. J.(1973): The growth of *Skeletonema costatum* during a winter-spring bloom in Narragansett Bay, R.I. *Norw. J. Bot.* 20, 219-247.

Steel, J. H.(1962): Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnol. Oceanogr.*, 7, 137-150.

Yamaguchi, M.(1991): The growth characteristics of diatom. In: Report of Ecological Measure

- for the Toxic Red Tide. Nansei National Fisheries Institute, pp. 55-66.
- Yanagi, T. and T. Yamamoto(1993): Data assimilation for prediction of coastal sea condition. J. Adv. Mar. Tec. Conf., 8, 85-98.
- Yanagi T., K. Inoue, S. Montani and M. Yamada (1997): Ecological modeling as a tool for coastal zone managment of Dokai Bay, Japan. Journal of Marine Systems, 13, 123-136.