

진동만에서 생태계모델을 이용한 환경관리기법

김 동 선
부경대학교 해양산업개발연구소
(2002년 8월 16일 접수; 2003년 3월 13일 채택)

A method of environmental management using an ecological numerical model in Jindong Bay

Dong-Sun Kim

Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
(Manuscript received 16 August, 2002; accepted 13 March, 2003)

Jindong bay at the northwestern part of Jinhae bay suffers from the occurrence of red tides in summer every year. In order to study the management methods of coastal environments, an ecological numerical model has been developed. The model experiments was forecasted that the load of nutrients from the land and field concentration will be cut down per 10% each.

When we cut down 57.2% nitrogen load in the inner bay and 38.4% phosphorous load in the outer bay of bottom layer of the nutrients load from land and field concentration, the seawater quality standard levels up first grade. When we cut down 86.5% nutrients in the inner bay and 93.0% nutrients in the outer bay, the concentration of chlorophyll a decreases below $3.2 \mu\text{g/l}$ (an individual concentration of phytoplankton : 10,000cell/ml), i.e. the red tides do not occur.

Key words : Ecological numerical model, Nutrients load, Chlorophyll a

1. 서 론

연안해역은 육지로부터 담수의 영향을 많이 받고 있으며, 영양염이 풍부하고 수심이 외양에 비하여 얇기 때문에 저층에 침강한 영양염도 쉽게 유광층으로의 상승이 용이하며, 생물 활동이 활발한 지역이다. 조류가 탁월한 연안해역에 순간적으로 투입된 염분과 같은 보존성 물질은 시간이 경과함에 따라서 왕복운동의 성질을 가진 조류(tidal current)와 일정한 방향성을 가지고 움직이는 잔차류(residual flow)가 중첩되어 분산되면서 잔차류에 의하여 물질이 퍼져나간다¹⁾. 이러한 물질수송의 이미지는 염분과 같이 성질이 변화하지 않는 보존성 물질의 경우이고 강이나 하천 등에 의해 연안역으로 많이 유입되는 질소나 인 등의 영양소와 같은 비보존성 물질의 경우에는 물질의 생화학적 형태변화에 대하여

물질의 농도가 변화하며, 이에 대한 물질의 수송과정은 매우 복잡하다. 따라서 수심일 이상의 시간크기에서는 조석, 밀도의 기울기 및 바람의 응력을 고려한 잔차류 등에 의한 물리적 과정에 따른 유동형태를 밝히고, 물질의 생화학적 과정을 고려하여 연안해역의 장기적인 물질이동을 구명하여야 한다.

진해만의 북서쪽에 위치하고 있는 진동만은 반폐쇄적인 내만으로 수심이 평균 15m로 얕으며, 지형적인 효과로 인하여 해수교환이 작을 뿐만 아니라 육상으로부터 유입되는 오염물질과 양식장에서 부하되는 물질로 인하여 수질 및 저질의 오염이 축적되어 있다²⁾. 더욱이 이 지역은 해수순환이 미약하고 양식장의 증가 등으로 해역이 갖고 있는 자정능력의 저하로 하계 부영양화 및 저질의 빈산소화가 진행되어 생물상 변화로 인한 적조 피해로 인하여 수산자원을 포함한 생태계 파괴를 초래하고 있다. 따라서, 연안해역의 환경보전을 위하여 필요한 새로운 환경을 개선할 필요가 있다. 이를 위해서는 생태계 현상을 충분히 고려한 환경측정 및 다양한 분야

Corresponding Author : Dong-Sun Kim, Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
Phone : +82-51-620-6875
E-mail : kimds0909@mail1.pknu.ac.kr

에 걸친 분석으로 수질, 저질, 생물상 및 환경변화에 의한 수산자원 즉, 해양의 생태계를 평가 할 수 있는 노력이 절실히 요구되고 있다.

수치생태계모델은 바다에서 일어나는 제현상에 관한 중요한 요소를 선정하고 이것으로부터 생물의 생활 및 생태에 대한 수식화를 통하여 수치적인 방법으로 환경문제의 해결책을 구하는 것이다. 이와 같이 생물의 동태를 수학적 기법으로 기술한 초기의 모델은 Fleming³⁾이 영국해협에서 식물플랑크톤의 계절변화를 연구하기 위하여 간단한 미분방정식을 수치적으로 해석하였다. 그 후 Riley⁴⁾는 조지뱅크에서 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 상호작용을 연립미분방정식으로 표시하여 북대서양에서 플랑크톤의 개체군을 계산하였다. 물리 및 생물과정의 융합모델은 Riley⁵⁾에 의해 개발되어서 해양혼합층의 심도와 식물플랑크톤의 생산량의 응답에 관하여 연구하였다. 또한 최근에 Ikeda and Kishi⁶⁾는 연안역의 기상 및 해양구조에 의한 3차원 생태계모델을 이용하여 적조의 발생, 증식, 집적에서 소실까지의 과정을 고찰하기 시작하여 수많은 연구자들이 해양에 생태계모델의 적용을 시도하여 왔다. 그러나, 해양마다 서로 다른 환경변화를 가지고 있기 때문에 그 지역의 환경특성을 이용한 다양한 방법에 의한 생태계모델의 응용이 연구 목적에 따라서 적절하게 사용되어야 할 필요성이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 매년 하계에 적조가 상습적으로 발생하는 진동만 북서쪽에 위치한 진동만에서, 부영양화 및 적조발생 억제에 위한 저차생태계 모델을 개발하여, 육상에서 유입되는 영양염 부하 및 현상농도 삭감량을 산정하여 환경관리기법의 적용방안을 제시 하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료

본 연구는 진동만의 관측정점(Fig. 1)에서 조사된 자료²⁾에서 1998년 8월에 관측한 수온, 염분 및 용존 무기질소(DIN: dissolved inorganic nitrogen), 용존 무기인(DIP: dissolved inorganic phosphate) 및 chlorophyll a 자료를 이용하여 경계자료 및 모델에 측 결과와 비교분석 하였다. 유동계산의 결과를 검증하기 위하여 관측정점 C2에 음향유속계(Nortek, Acoustic Doppler Profile)를 설치하여 1998년 8월 4일 14:00부터 25시간동안 관측한 유동자료를 이용하였다. 또한 이 지역의 기상환경요인을 파악하기 위하여 정점 C1에 인접한 섬(송도)에서 기상관측장비 AWS(Automatic Weather System: AANDERRA Inc.)를 설치하여 자료를 분석하였다.

2.2. 유동계산

진동만에서 잔차류(residual flow)는 수온과 염분의 관측값을 이용하여 진단모델(diagnostic model)로 계산하였다. 밀도류는 경압적(baroclinic)인 구조를 갖고 있기 때문에 3차원으로 계산하였으며, 잔차류운동을 지배하는 기초방정식은 다음과 같다⁷⁾. 본 연구해역에서 계산격자는 수평적으로 300×300m의 정방격자, 연직적으로는 표층(0~1m), 중층(1~8m) 및 저층(8m~bottom)의 3층으로 분할하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} + W\frac{\partial U}{\partial z} - fV \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + A_h \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + T_x \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + W\frac{\partial V}{\partial z} + fU \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + A_h \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + T_y \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$P = g\eta + \int_0^{-z} Bdz \quad (4)$$

$$B = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} g \quad (5)$$

$$T_x = -\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right), \quad T_y = -\left(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (6)$$

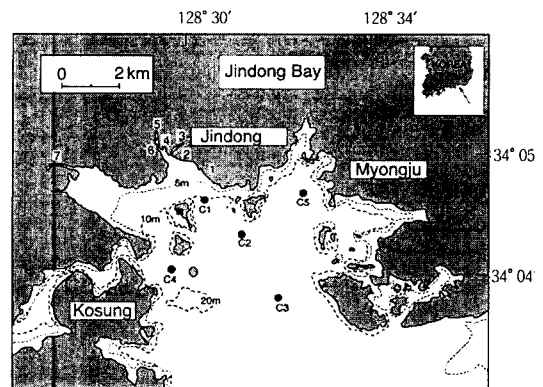


Fig. 1. The oceanographic observation points in the Jindong bay. Depths are in meters.

(● : observation points, ■ : meteorological station(Songdo), 1: Jindong 1, 2: Jindong 2, 3: Jindong 3, 4: Tabongchun, 5: Jindongchun, 6: Ingokchun, 7: Jinjunchun)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U\frac{\partial T}{\partial x} + V\frac{\partial T}{\partial y} + W\frac{\partial T}{\partial z} = K_h\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_h\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_v\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \gamma(T^* - T) \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U\frac{\partial S}{\partial x} + V\frac{\partial S}{\partial y} + W\frac{\partial S}{\partial z} = K_h\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + K_h\frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + K_v\frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \gamma(S^* - S) \quad (8)$$

여기서 U, V 와 W 는 각각 잔차류의 x, y 및 z 성분, ρ 는 물의 밀도, ρ_0 는 연직평균밀도, γ 는 $0.5/\Delta t$, $\Delta t=5\text{sec}$, T^*, S^* 는 각각 수온과 염분의 관측값, T, S 는 수온과 염분의 계산값, K_h, K_v 는 수평·연직확산계수로 혼합거리이론을 근거로 하여 조류의 진폭값으로 식(9)와 같이 계산하였다. 또한 T_x, T_y 는 조석응력(tidal stress)이며, 조류(u, v)의 비선형항이 조석잔차류를 구동하는 것을 나타내고 있다.

$$A_h = \frac{2\alpha T}{\pi^2} u_{am}^2, u_{am} = \sqrt{u_a^2 + v_a^2},$$

$$A_v = RA_h, K_h = 0.1A_h, K_v = RK_h \quad (9)$$

여기서 $\alpha(=0.08)$ 는 1조석주기의 혼합율, $T(=$

44700sec)는 M_2 의 조석주기, u_a, v_a 는 x 와 y 방향의 M_2 조류의 진폭, $R(=10^{-4})$ 는 진동만의 aspect ratio, 식(9)에서 진동만의 A_h 는 약 $1.0 \times 10^5 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ~ $5.5 \times 10^5 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ 범위의 값을 나타내고 있다.

해면($z=\eta$)과 해저($z=-h$)에서의 경계조건은 각각 식(10)~(11) 및 (12)~(13)과 같다.

$$\rho_0 \left(A_v \frac{\partial U}{\partial z}, A_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) = (\tau_x^s, \tau_y^s) \quad (10)$$

$$(\tau_x^s, \tau_y^s) = \rho_a C_a (W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}) \quad (11)$$

$$\rho_0 \left(A_v \frac{\partial U}{\partial z}, A_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) = (\tau_x^b, \tau_y^b) \quad (12)$$

$$(\tau_x^b, \tau_y^b) = \rho_0 \gamma_b^2 (U \sqrt{U^2 + V^2}, V \sqrt{U^2 + V^2}) \quad (13)$$

여기서, $\rho_a(=0.0012 \text{g cm}^{-3})$ 는 공기의 밀도, $C_a(=0.0013)$ 는 해면의 저항계수, $\gamma_b^2(=0.0026)$ 는 해저마찰계수, W_x, W_y 는 풍속의 x, y 성분으로 연구해역의 송도(Fig. 1에 ■로 표시)에 기상관측장비 AWS (Automatic Weather System: AANDERRA Inc.)를 설치하여 수집한 1998년 7월 평균값(2.2m/s, NNE)을 이용하였다. 연안과 외해 경계역에서 $U=V=0$ 로 계산하였다. 유동계산에 사용한 모델의 입력인자를 Table 1에 나타내었다.

2.3. 생태계모형

연안역에서 저차생태계를 구성하고 있는 5성분(DIN, DIP, phytoplankton, zooplankton 및 detritus)에 대한 상호관계식⁸⁾을 아래와 같이 나타내었다(Fig. 2).

DIN(N_N):

$$\frac{\partial N_N}{\partial t} + u\frac{\partial N_N}{\partial x} + v\frac{\partial N_N}{\partial y} + w\frac{\partial N_N}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial N_N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial N_N}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial N_N}{\partial z} \right) - A1R_{NC}P + A2R_{NZD}Z + A3R_{NZD}D \quad (14)$$

DIP(N_P):

$$\frac{\partial N_P}{\partial t} + u\frac{\partial N_P}{\partial x} + v\frac{\partial N_P}{\partial y} + w\frac{\partial N_P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial N_P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial N_P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial N_P}{\partial z} \right) - A1R_{PC}P + A2R_{PZD}Z + A3R_{PZD}D \quad (15)$$

Phytoplankton(P):

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u\frac{\partial P}{\partial x} + v\frac{\partial P}{\partial y} + w\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial P}{\partial z} \right) + A1P - A2P - A3R_{CZ}Z \quad (16)$$

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 300\text{m}$
Total mesh	$44 \times 28 \times 3 = 3,696$
Water depth	chart datum+MSL
Time interval(Δt)	5sec
Layer	upper layer: 0~1m middle layer: 1~8m lower layer: 8m~bottom
Water temperature at open boundary	upper layer: 27.38~27.82°C middle layer: 24.81~25.08°C lower layer: 21.22~21.92°C
Salinity(PSU) at open boundary	upper layer: 26.92~27.79 middle layer: 28.86~29.41 lower layer: 31.07~32.36
Coriolis coefficient(f)	$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi$
Horizontal viscosity coefficient(A_h)	$A_h = 1.0 \times 10^9 \sim 5.5 \times 10^9 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
Vertical viscosity coefficient(A_v)	$A_v = 1.0 \times 10 \sim 5.5 \times 10 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
Horizontal diffusion coefficient(K_h)	$K_h = 1.0 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
Vertical diffusion coefficient(K_v)	$K_v = 1.0 \sim 5.5 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
Bottom friction coefficient	0.0026
Calculation time	3 days

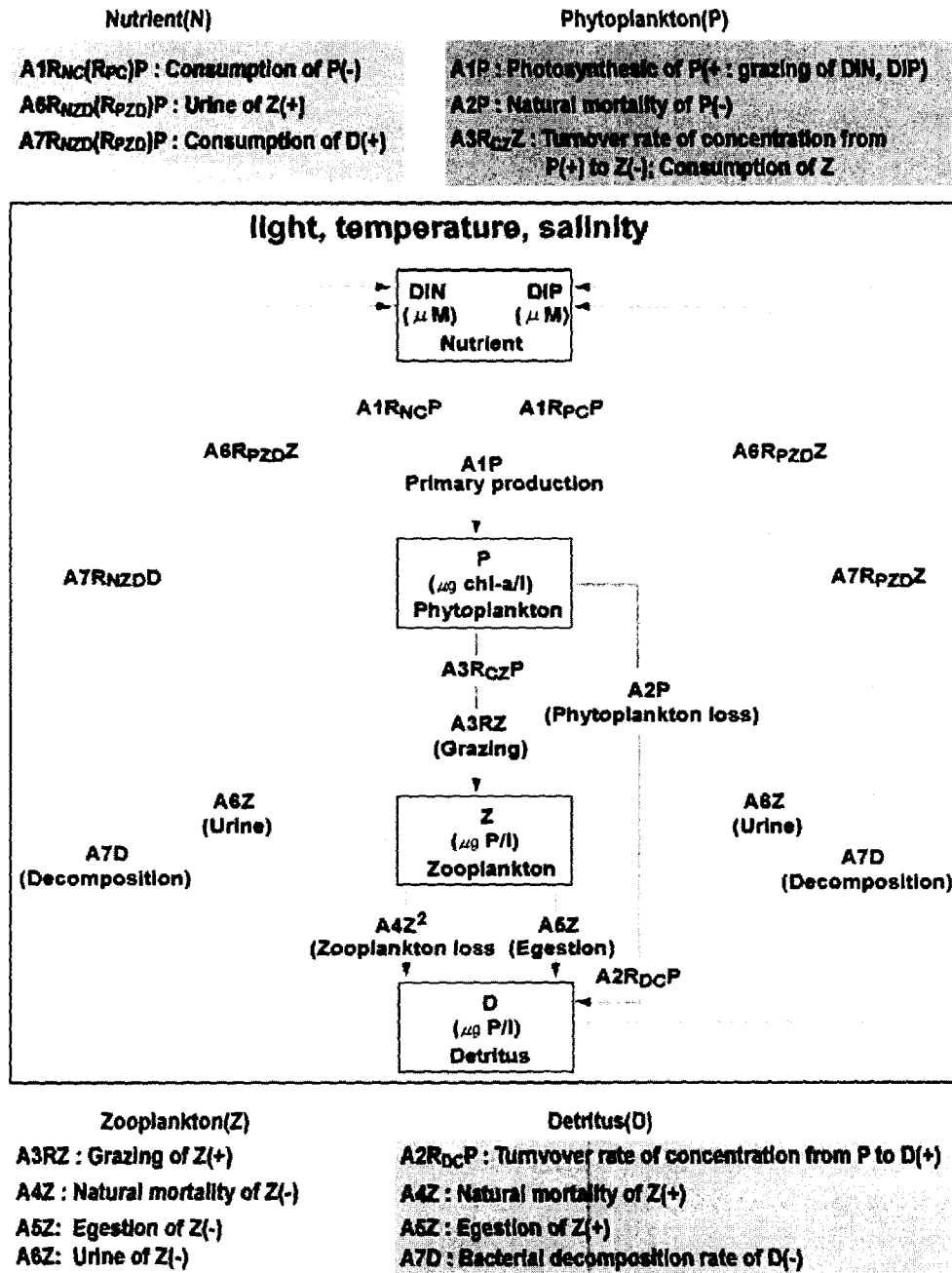


Fig. 2. Components of this numerical ecosystem model.

Zooplankton(Z):

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} + w \frac{\partial Z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial Z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right) + A3RZ - A4Z - A5Z - A6Z \quad (17)$$

Detritus(D):

$$\frac{\partial D}{\partial t} + u \frac{\partial D}{\partial x} + v \frac{\partial D}{\partial y} + w \frac{\partial D}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial D}{\partial z} \right) + A2R_{DC}P + A4Z + A5Z - A7D \quad (18)$$

진동만에서 생태계모델을 이용한 환경관리기법

여기서, u, v, w 는 흐름의 x 방향, y 방향, z 연직상 방향성분, K_x, K_y 및 K_z 는 각각 x, y, z 방향의 확산계수를 나타내고 있다. 생태계모델에 사용한 입력 인자들을 Table 2에 나타내었다.

또한 R_{NCP}, R_{PCP} 는 각각 식물플랑크톤에 대한 DIN과 DIP농도의 전환율(=0.67, 0.042), R_{NZDZ}, R_{PZDZ} 는 각각 동물플랑크톤에 대한 DIN 및 DIP농도의 전환율(=0.52, 0.032), R_{NZD}, R_{PZD} 는 각각 detritus에 대한 DIN 및 DIP농도의 전환율(=0.52, 0.032)을 나타내고 있다. 또한, $A1$ 와 $A2$ 는 각각 식물플랑크톤의 성장속도와 동물플랑크톤의 배설속도이며, $A3$ 는 detritus에 대한 bacteria의 분해율(=0.3 day⁻¹)로 계산하였다.

$$A1 = V_m \cdot \text{MIN}\{V1(N_N), V1(N_P)\} \cdot V2(I) \cdot V3(T) \cdot V4(S) \quad (19)$$

$$A2 = \chi R_{\max} \quad (20)$$

식(19)와 (20)에서 V_m (=2.0 day⁻¹)은 최대 광합성을, 영양염의 제한인자로서 리비히의 최소량법칙에 의한 식물플랑크톤의 영양염농도는 $V1(N_N) = N_N / (K_{SN} + N_N)$, $V1(N_P) = N_P / (K_{SP} + N_P)$, 식물플랑크톤의 빛에 대한 영향은 $V2(I) = I / I_{OPT} \exp(1 - I / I_{OPT})$, $I = I_S \exp(-kd)$, 식물플랑크톤의 수온과 염분에 따른 성장속도는 James and Ralph⁹의 곡선형 관수에

의 해서 $V3(T) = T_{EM} / T_{OPT} \exp(1 - T_{EM} / T_{OPT})$, $V4(S) = S / S_{OPT} \exp(1 - S / S_{OPT})$ 와 같이 계산하였다. 여기서 K_{SN}, K_{SP} 는 각각 질소와 인에 관계하는 반포화상수(=3.0, 0.1 μM)¹⁰, I 는 빛의 량, I_{OPT} 는 빛의 최적량(=2.4 cal cm⁻² day⁻¹)¹¹, k 는 빛의 소산계수(=0.7), I_S 는 해면광량으로 부산지역의 1998년 7월 평균조도(=316 cal cm⁻² day⁻¹), T_{EM}, S 는 각각 수온과 염분의 관측값, T_{OPT}, S_{OPT} 는 각각 식물플랑크톤의 최적수온 및 염분값(=25 °C, 30 psu)¹², χ 는 동물플랑크톤의 소변계수(=0.3 day⁻¹)¹³를 나타내고 있다. 또 $A3R_{CZ}$ ($A3RZ$)는 식물플랑크톤에서 동물플랑크톤으로의 농도전환율(즉, 동물플랑크톤의 섭취량)을 나타내고 있으며, $A4Z$ ($A4 = 0.05$ (mgN/m³ · day)⁻¹)는 동물플랑크톤의 자연취사율, $A5Z$ 는 동물플랑크톤의 배설량, $A6Z$ ($A6 = 0.1$ day⁻¹)는 동물플랑크톤의 배설량, $A2R_{DCP}$ 는 식물플랑크톤에서 detritus로의 농도전환율이고, $A7D$ ($A7 = 0.05$ day⁻¹)¹⁴는 detritus의 재분비를 나타내고 있다. $A3$ 와 $A5$ 는 각각 식(21)과 (22)로 계산하였다.

$$A3 = R_{\max} [1 - \exp \lambda(-P + P^*)] \quad (21)$$

$$A5 = \iota R_{\max} [1 - \exp \lambda(-P + P^*)] \quad (22)$$

여기서 R_{\max} (=1.5 day⁻¹)는 최대섭식율¹⁵, λ 는 Ivlev 상수(=0.47 (mg Chl. a/m³)⁻¹)¹⁶, P^* 는 동물플랑크톤의 가능 섭취량에 대한 식물플랑크톤 농도의 한계, P 가 P^* 보다 작을 때 $A3$ 는 zero로 계산한다. 또 ι (=0.2)는 동물플랑크톤의 fecal pellet 계수를 나타내고 있다¹⁷. 이상과 같이 모델에 입력되는 매개변수는 기존의 측정자료와 문헌자료를 통하여 적절하게 사용하였다. 생태계모델에 사용되는 매개변수의 기호 및 정의와 사용된 값은 Table 3에 제시하였다.

2.4. 부하량 및 현장농도 삭감량 산정방법

진동만에서 발생하는 영양염 유입원으로는 크게 하천을 통한 육상부하, 저질의 유기물 분해에 기인한 영양염 용출부하 및 외해 경계역으로부터의 유입 그리고 대기로부터의 유입부하 등으로 분류할 수 있다.

하천에서 유입되는 영양염중 용존무기인(DIP)의 경우 가장 큰 유량이 유입되고 있는 진전천에서 용존무기질소(DIN) 유입과는 다르게 용존무기인의 유입량이 가장 낮게 나타났다(Table 4)¹⁸. 하천에서 유입 부하량만을 고려 할 때에는 Fig. 6에서 만안 쪽이외의 다른 지역에서 볼 수 있는 고농도의 용존

Table 2. Input data for ecosystem model

Parameter	Input value			
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 300\text{m}$			
Water depth	chart datum+MSL			
Time interval(Δt)	5sec			
Calculation time	30 days			
Initial condition for compartments				
Layer	DIN ($\mu\text{g} \cdot \text{at/L}$)	DIP ($\mu\text{g} \cdot \text{at/L}$)	Chl.a ($\mu\text{g/L}$)	ZOO (cells/L)
upper	24.289	0.186	22.502	73
middle	15.159	0.436	9.922	65
lower	16.920	1.287	2.140	57
Compartments at open boundary				
Layer	DIN ($\mu\text{g} \cdot \text{at/L}$)	DIP ($\mu\text{g} \cdot \text{at/L}$)	Chl.a ($\mu\text{g/L}$)	ZOO (cells/L)
upper	6.528~19.939	0.074~0.186	22.640~32.220	65~72
middle	7.949~12.710	0.112~0.661	14.567~19.810	53~64
lower	5.941~13.028	0.056~1.285	2.930~3.140	40~55
Diffusion coefficient on x direction(K_x)	$K_x = 1.0 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$			
Diffusion coefficient on y direction(K_y)	$K_y = 1.0 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$			
Vertical diffusion coefficient(K_z)	$K_z = 1.0 \sim 5.5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$			

Table 3. The biological parameters used in the ecosystem model

Symbol	Definitions	Values	Unit
R _{NCP}	Conversion ratio of concentration of DIN to that of phytoplankton	0.67	
R _{PCP}	Conversion ratio of concentration of DIP to that of phytoplankton	0.0042	
R _{NZDZ}	Conversion ratio of concentration of DIN to that of zooplankton	0.52	
R _{PZDZ}	Conversion ratio of concentration of DIP to that of zooplankton	0.032	
R _{NZDD}	Conversion ratio of concentration of DIN to that of detritus	0.52	
R _{PZDD}	Conversion ratio of concentration of DIP to that of detritus	0.032	
R _{CZ}	Conversion ratio of concentration of phytoplankton to that of zooplankton	0.75	
R _{DC}	Conversion ratio of concentration of detritus to that of phytoplankton	1.31	
A ₂	Natural death rate of phytoplankton	0.33	day ⁻¹
V _m	Maximum photosynthetic rate	2.0	day ⁻¹
K _{SN}	Half saturation constant for nitrogen	3.0	μM
K _{SP}	Half saturation constant for phosphorus	0.1	μM
I _{OPT}	Optimum light intensity for phytoplankton	2.4	cal ⁻¹ cm ² day ⁻¹
k	Dissipation coefficient of light	0.7	
I _S	Light intensity on sea surface	316	cal cm ⁻² day ⁻¹
T _{OPT}	Optimum temperature for phytoplankton	25	°C
S _{OPT}	Optimum salinity for phytoplankton	30	PSU
A _{4Z}	Natural death rate of zooplankton	0.05	mgN/m ³ day ⁻¹
A _{6Z}	Urine coefficient of zooplankton	0.1	day ⁻¹
A _{7D}	Decomposition of detritus	0.05	day ⁻¹
R _{max}	Maximum grazing rate of zooplankton	1.5	day ⁻¹
λ	Ivlev constant	0.47	(mgChl.a/m ³) ⁻¹
P*	Threshold of phytoplankton in grazing	0.1	(mgChl.a/m ³)
ι	Fecal pellet coefficient of zooplankton	0.2	day ⁻¹
S _P	Sinking velocity of phytoplankton	35	cm s ⁻¹
S _D	Sinking velocity of detritus	100	cm s ⁻¹

Table 4. The pollutant loads of rivers flow into the Jindong Bay

No. (Fig.1)	Name of River	Pollutant loads		
		River flow (ton day ⁻¹)	DIN (μg · at/L)	DIP (μg · at/L)
1	Jindong 1	346	621.071	3.290
2	Jindong 2	24,192	981.429	23.452
3	Jindong 3	25,920	1,060.571	1.387
4	Taebongchun	54,847	372	1.258
5	Jindongchun	28,080	225.071	1.323
6	Ingokchun	25,466	162.571	0.613
7	Jinjenchun	111,197	1,600	0.419

무기인 분포를 설명 할 수 없다. 따라서 하천 유입 부하 지역 이외의 다른 영역에서 나타나는 고농도의 영양염은 육상유입 부하 이외 다른 영향, 특히 저질의 유기물 분해에 의한 영양염 용출 부하 등에 의한 역할을 생각해 볼 수 있다. 그러나 이 지역에서 하천유입 부하량 이외의 다른 영향에 의한 영양염 부하량에 대하여 조사한 자료는 거의 없는 실정이다. 따라서 하천 유입 부하량 이외에 연구영역의

Table 5. The field concentration of DIN and DIP in the Jindong Bay of August, 1998

Compartments	Layer	Stn. C1	Stn. C2	Stn. C3	Stn. C4	Stn. C5
		DIN (μg · at/L)	50.071	20.105	6.528	23.939
DIP (μg · at/L)	upper	0.223	0.112	0.074	0.186	0.336
	middle	0.335	0.112	0.112	1.061	0.558
	lower	1.680	1.675	0.056	1.285	1.737

영양염 농도분포에 영향을 주는 환경요인을 파악하기 위한 차선책으로 하천 유입부하 뿐 만 아니라 다른 점원에서 유입된 부하량도 동시에 포함하고 있는 영양염의 현장 농도를 이용하여 해역의 영양염 농도 분포의 정량적인 평가를 시도한다(Table 5).

먼저 하천 유입 부하량 삭감은 Table 4에서 하천의 유입량과 영양염 부하량을 10%씩 삭감하여 연구해역 특히 만 안쪽에서 하천에 의한 영양염 농도 분포의 변화를 조사하였다. 비교 정점으로는 하천 부하량에 직접적으로 영향을 받는 만 안쪽의 정점 C1

과 하천 유입 부하의 영향이 상대적으로 약한 지역인 만 바깥쪽 정점 C3에서 영양염의 농도변화를 계산하였다.

하천 유입에 의한 영양염 부하 영향이 뚜렷하게 나타나는 만 안쪽과 하천 유입의 영향이 상대적으로 적게 나타나는 다른 영역에서의 영양염 부하에 따른 농도분포를 파악하기 위하여, 영양염의 현장농도(Table 5)를 이용하여 객관적 보간법(objective interpolation)에 의한 각 수층의 계산격자에서 영양염의 현장 농도를 산출하였다. 그리고 계산격자에서 산출한 영양염의 현장농도를 10%씩 삭감 할 경우 나타나는 농도분포의 변화를 평가하기 위하여 하천 유입 부하가 큰 만 안쪽(정점 C1)과 이 지역과 상대적으로 비교영역인 만 바깥쪽인 정점 C3에서 영양염의 변동을 계산하였다. 객관적 보간법은 (23)식과 같으며 여기서 $V_{i,j}$ 는 구하고자 하는 격자점(i,j)의 환경인자, V_{os} 는 관측점 s에서의 환경인자 관측값, L_s 는 값을 구하고자하는 격자점으로부터 관측점 s까지의 거리를 나타내고 있다.

$$V_{i,j} = \sum \frac{V_{os}}{L_s} / \sum \frac{1}{L_s} \quad (23)$$

또한 영양염의 하천 유입 부하 및 현장농도의 삭감 정도에 따라 어떤 적조발생 환경을 해소시킬 수 있는지를 조사하기 위하여 만 안쪽인 정점 C1과 만 바깥쪽인 정점 C3에서 영양염의 농도변화에 따른 chlorophyll a 농도를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 해수유동 계산

M₂ 조석잔차류(tide induced residual current) 및

정점 C2에서 유동관측값으로부터 분석한 조류타원도와 수치계산의 결과를 조류타원도로 Fig. 3(a, b)에 나타내었다. M₂ 조석잔차류의 결과를 보면, 고성군 앞 바다에서 약 1.0cm/s의 유속의 세기로 밖으로 유출되고 있으며, 만 중앙부에서는 반시계방향의 환류성분이 나타나며, 전 해역의 평균유속이 매우 미약한 흐름이 존재하고 있다. M₂ 조석잔차류가 만 중앙부에서 반시계방향의 회전하는 흐름을 보이는 것은 만중앙부가 주변보다 깊고, 이러한 지형의 효과에 의해서 발생하는 것으로 사료된다(Fig. 3a). 현장에서 관측에 의한 유동과 모델의 계산값을 비교해 보면 진동만 중앙부에 위치하고 있는 정점 C2에서 조류타원도의 단축방향은 계산값이 관측값보다 조금 큰 경향을 보이고 있지만, 유속의 세기와 방향은 유사하게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 조류모델의 계산결과는 전반적으로 진동만의 조류에 의한 유동양상을 비교적 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다(Fig. 3b).

Fig. 4(a, b, c)는 바람, 밀도 효과 및 조석잔차류를 고려한 잔차류(residual flow), 바람의 효과를 고려한 취송류(wind driven current) 및 밀도류(density driven current)의 계산결과를 나타낸 것이다. 먼저 표층에서의 잔차류는 만안쪽 북동역에서 만입구 남서쪽으로 바람방향(2.2m/s, NNE)에 의한 남서류의 유동형태를 보이고 있으며, 만 중앙부에서 만입구까지는 남향류를 나타내고 있으며, 중층에서는 전반적으로 남동쪽으로의 흐름양상을 보이고 있다. 저층에서의 흐름은 만 바깥쪽에서 안쪽으로 북향류의 양상을 보이고 있다. 진동만에서 잔차류 계산의 타당성을 조사하기 위하여 정점 C2에서 관측한 유동자료를 조화분해하여 조석성분을 제거한 유동성

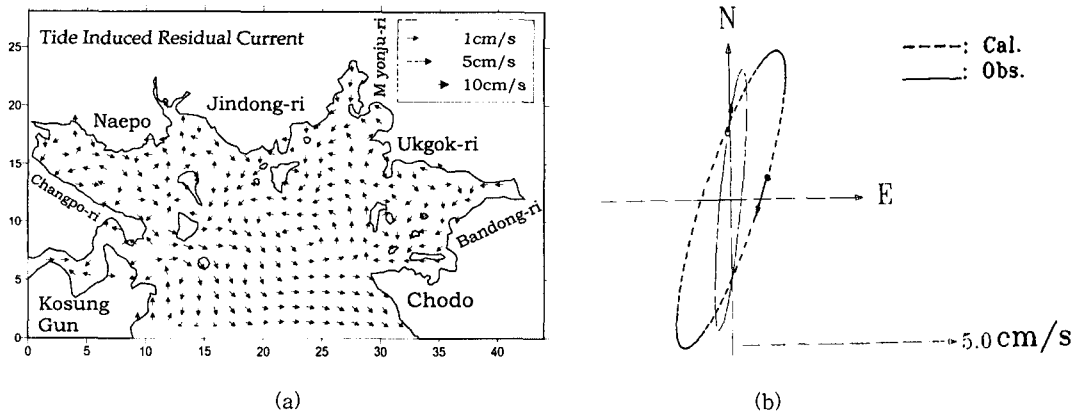


Fig. 3. The result of numerical model on tide induced residual current(M₂) in Jindong Bay(a). Observed(full line) and calculated(dotted line) of tidal current ellipses at C2 in Jindong bay.

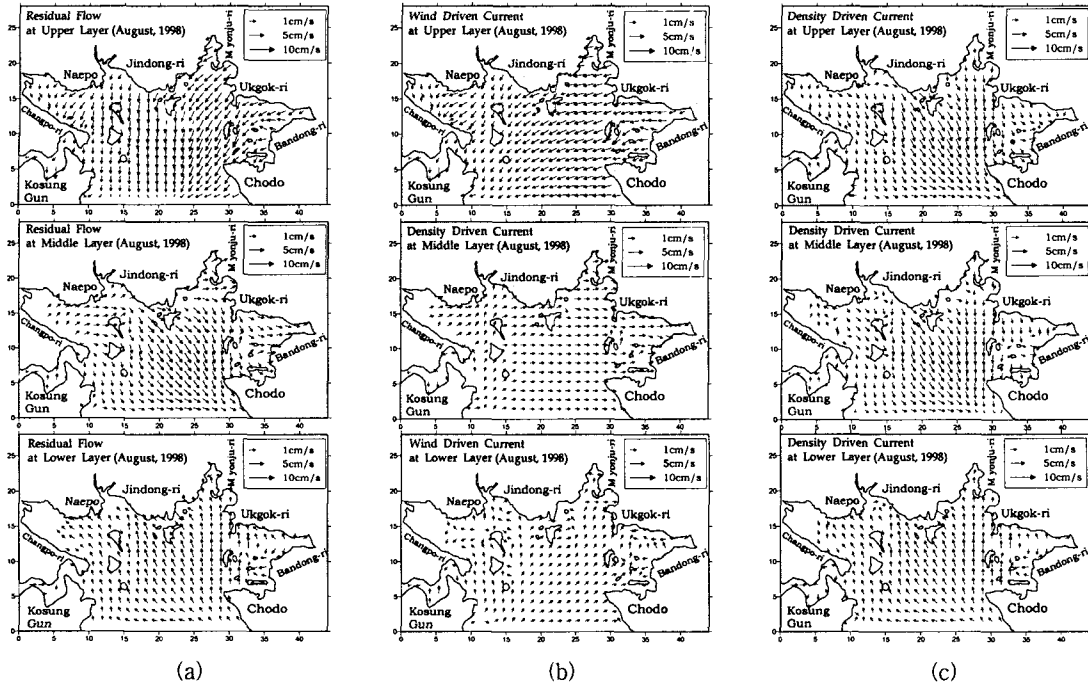


Fig. 4. The result of numerical model on residual flow(a), wind driven current(b) and density driven current(c) at upper layer(0~1m), middle layer(1~8m) and lower layer(8m~bottom) in Jindong Bay.

분과 계산값을 Fig. 5에 나타내었다. 잔차류의 계산 값(점선)은 관측값(실선)에 대하여 유속의 크기나 남쪽으로의 흐름의 형태를 보이고 있기 때문에 계산된 잔차류는 현장을 잘 재현하고 있다. 취송류의 유동분포를 보면, 표층에서는 바람방향에 따른 남서

류의 흐름양상을 보이고 있으며, 중층과 저층에서는 표층의 흐름에 대한 보상류의 형태를 보이고 있다. 이와 같은 현상은 진동만에서 에크만 수심이 16m로 계산되었으며 이것은 이 지역의 전체수심(최고수심 20m)이 표층마찰에 영향을 받아 나타나는 것으로 생각된다¹⁹⁾. 또한 밀도류는 표층과 중층에서 만 안쪽에서 바깥쪽으로의 남동류의 형태를 보이고 있으며, 저층에서는 표층과 중층의 흐름과는 반대방향의 흐름 양상을 나타내고 있다. 따라서 잔차류의 분포를 보면, 표층에서는 바람성분과 밀도의 효과로 인하여 발생하는 흐름이 중첩된 형태의 흐름 양상을 보이고 있으나, 중층과 저층에서는 밀도류의 성분이 잔차류의 분포에 영향을 주고 있다.

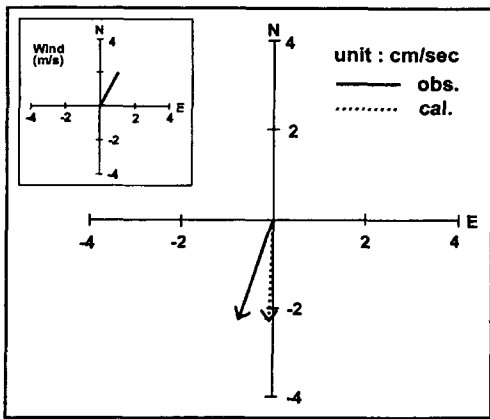


Fig. 5. Comparison of the observed result with the calculated result of numerical model on residual flow at St. C2 of Jindong bay(solid line means result observed by field measurement and dashed line means result calculated by numerical model).

3.2. 생화학적인자 시뮬레이션

하계(1998년 8월) 진동만에서 영양염의 수평분포를 Fig. 6에 나타냈다. 용존무기질소(DIN : dissolved inorganic nitrogen)의 수평분포는 만 안쪽인 북서쪽의 표층에 각각 $30 \mu\text{g} \cdot \text{at/l}$ 이상의 고농도 분포를 보이고 있으며, 만의 입구쪽으로 갈수록 저농도 분포를 나타내고 있다. 또한 용존무기인(DIP : dissolved inorganic phosphorous)은 표·중층에 비하여 저층에서의 고농도현상이 뚜렷하며, 만의 안쪽 저층에서는 $1.5 \mu\text{g} \cdot \text{at/l}$ 이상의 고농도, 만 바깥쪽에서는 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{at/l}$ 이하의 저농도 현상을 보이고 있

진동만에서 생태계모형을 이용한 환경관리기법

다. 한편, chlorophyll a의 분포를 보면, 표층에서는 만 안쪽과 정점 C2 부근이 다른 지역보다 $20 \mu\text{g}/\text{l}$ 이하의 저농도를 보이고 있으며, 만 안쪽보다 만 바깥 쪽이 고농도의 분포를 나타내고 있다. 중층과 저층의 분포를 보면 표층에 비하여 농도는 작아지고 있으며, 저층에서는 만 안쪽이 $2 \mu\text{g}/\text{l}$ 이하로 만 바깥쪽보다 저농도의 분포 특성을 보이고 있다.

하계 진동만에서 조석간차류, 바람, 밀도의 수평 경도력의 효과를 고려한 잔차류에 의한 영양염 및 chlorophyll a 분포를 Fig. 7에 나타냈다. 먼저 용존 무기질소의 계산결과를 보면, 고성군 바로 위에서 표층, 중층 및 저층에 $15 \sim 20 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 이상의 고농도분포가 만 중앙부와 동북쪽 지역에 나타났다. 용존무기인의 분포양상을 보면 표층과 중층에서의 계산결과를 관측값과 비교해 보면 공간적분포 차이를 보이고 있으나, 저층에서 고농도의 관측값의 재현은 잘 나타나고 있다. 특히 저층에서 잔차류로 인한 계산결과는 표층과 중층에 비하여 고농도를 보이고 있으며, 만 중앙부에 걸쳐 있는 $1.5 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 이상의

고농도의 공간분포는 관측값에 매우 근접하고 있는 결과를 도출하였다. 계산 결과 저층의 고농도 용존 무기인분포가 잘 재현되었는데, 이와 같은 저층의 고농도의 용존무기인 분포는 용존무기질소의 수평 분포와는 달리 해저의 오염된 퇴적층에서의 활발한 용출작용으로 인하여 저층의 용존무기인 농도가 표층의 농도보다 큰 값을 유지하여 나타나는 것으로 사료된다²⁾.

생태계모델의 적용성을 검토하기 위해서 5개의 조사정점에서 각 수층별 용존무기질소, 용존무기인 및 chlorophyll a의 실측값과 계산값을 비교한 결과를 Table 6에 제시하였다. Table 6에서 용존무기질소의 경우 표층 평균실측값은 $24.29 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 로 나타났다으며, 평균계산값은 $18.85 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 로 나타났고, 상대오차는 22.4%였다. 중층의 경우는 평균 실측값은 $14.21 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$, 평균계산값은 $13.23 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 로 나타났고 6.9%의 상대오차를 나타내었으며, 저층의 경우는 평균실측값이 $15.74 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$, 평균계산값이 $14.66 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 으로 상대오차는 6.9%로 나타났다.

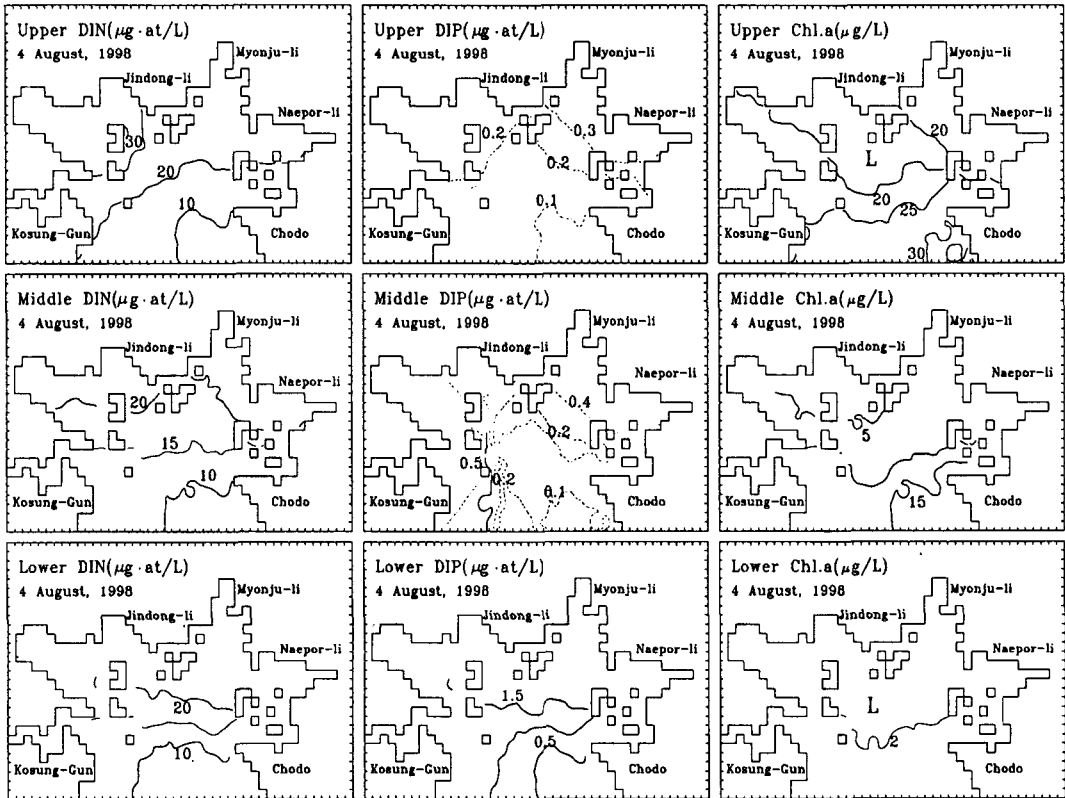


Fig. 6. Horizontal distributions of observed DIN(left column), DIP(middle column) and chlorophyll a(right column) at the upper(top panel), middle(middle panel) and lower layer(bottom panel) in Jindong bay of August, 1998.

중·저층보다 표층에서 다소 높은 상대오차를 보이고 있으나, 전반적으로 용존무기질소의 상대오차는 양호한 것으로 나타났다.

용존무기인의 경우를 보면, 표층평균실측값은 $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$, 평균계산값은 $0.23 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 로 상대오차는 21.1%였다. 중층의 경우는 평균실측값이 $0.46 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$, 평균계산값이 $0.52 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 로 상대오차는 13.0%, 저층에서는 평균실측값이 $1.56 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$, 평균계산값이 $1.30 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 로 상대오차는 16.7%로 매우 양호하게 나타났다.

Chlorophyll a의 경우 표층 평균실측값은 $21.09 \mu\text{g}/\text{l}$, 평균계산값은 $22.76 \mu\text{g}/\text{l}$ 로 나타났고 상대오차는 7.9%였다. 중층의 경우는 평균실측값이 $8.33 \mu\text{g}/\text{l}$, 평균계산값이 $9.95 \mu\text{g}/\text{l}$ 로 나타났고 19.4%의 상대오차가 나타났으며, 저층의 경우는 평균실측값이 $1.87 \mu\text{g}/\text{l}$, 평균계산값은 $2.49 \mu\text{g}/\text{l}$ 로 나타났고 상대오차는 33.2%로 나타났다. 표·중층에 비하여 저층의 상대오차가 높게 나타났으나, 전체적으로 양호

한 값을 보이고 있다.

3.3. 부하량 및 현장농도 삭감량 산정

진동만 안쪽(정점 C1)에서의 용존무기질소(DIN)는 해역의 수질환경기준 II등급(DIN: $42.6 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 이하) 수준이며, 만 바깥쪽(정점 C3) 저층에서의 용존무기인(DIP)은 III등급(DIP: $2.90 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 이하)의 수질을 가지며, 이러한 현상은 육상에서 유입되는 영양염과 기존의 저층에 누적된 영양염의 영향으로 사료된다. 따라서 두 정점에서의 수질을 향상시키기 위하여 영양염 부하량 삭감에 따른 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 육상유입의 영양염 부하량을 10%씩 삭감한 경우 만 바깥쪽(정점 C3)에서 용존무기인의 경우 98.4% 삭감하면 I등급(DIP: $0.97 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 이하) 수질로의 향상을 볼 수 있으나, 만 안쪽(정점 C1)에서의 용존무기질소의 경우 부하량을 100% 삭감하여도 수질 I등급(DIN: $21.4 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\text{l}$ 이하)으로의 수질향상은 기대 할 수 없었다(Fig. 8(A)). 현장 농도값을 이용한 초기값을 10%씩 삭감하였을 때, 수

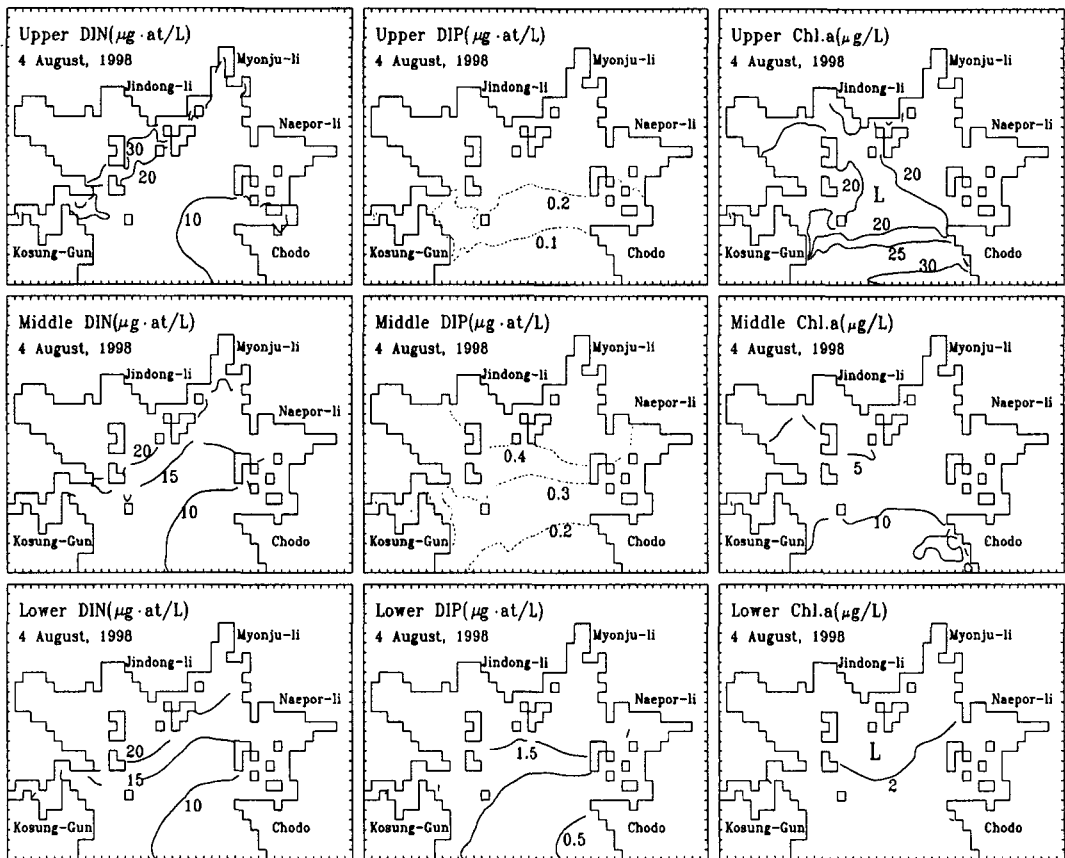


Fig. 7. Horizontal distributions of calculated DIN(left column), DIP(middle column) and chlorophyll a(right column) at the upper(top panel), middle(middle panel) and lower layer(bottom panel) in Jindong bay.

진동만에서 생태계모델을 이용한 환경관리기법

Table 6. The comparison of the computed(Co.) with the observed(Ob.) DIN(dissolved inorganic nitrogen), DIP(dissolved inorganic phosphorus) and chlorophyll a at upper layer(0~1m), middle layer(1~8m) and lower layer(8m~bottom) in Jindong Bay (R.E.: relative errors)

St.	DIN($\mu\text{g} \cdot \text{at/l}$)								
	Upper layer			Middle layer			Lower layer		
	Ob.	Co.	R.E.	Ob.	Co.	R.E.	Ob.	Co.	R.E.
1	50.07	43.81	12.5						
2	20.11	12.60	37.2	17.20	13.71	20.3	21.00	15.15	27.9
3	6.53	9.72	48.9	7.95	9.12	14.7	5.94	8.80	48.1
4	23.94	10.31	56.9	12.71	11.62	8.6	13.03	14.65	12.4
5	20.80	17.79	14.5	18.97	18.45	2.7	23.00	20.04	12.9
mean	24.29	18.85	22.4	14.21	13.23	6.9	15.74	14.66	6.9

St.	DIP($\mu\text{g} \cdot \text{at/l}$)								
	Upper layer			Middle layer			Lower layer		
	Ob.	Co.	R.E.	Ob.	Co.	R.E.	Ob.	Co.	R.E.
1	0.22	0.32	45.5						
2	0.11	0.21	90.9	0.11	0.65	490.9	1.16	1.20	3.5
3	0.07	0.02	71.4	0.11	0.12	9.1	0.57	0.58	1.8
4	0.19	0.31	63.2	1.06	0.42	60.4	1.11	1.25	12.6
5	0.34	0.30	11.8	0.56	0.89	58.9	3.39	2.15	36.6
mean	0.19	0.23	21.1	0.46	0.52	13.0	1.56	1.30	16.7

St.	Chlorophyll a($\mu\text{g/l}$)								
	Upper layer			Middle layer			Lower layer		
	Ob.	Co.	R.E.	Ob.	Co.	R.E.	Ob.	Co.	R.E.
1	18.97	21.61	13.9						
2	18.38	15.47	15.8	5.50	8.52	54.9	1.47	1.76	19.7
3	24.77	31.03	25.3	12.02	13.82	15.0	2.26	3.98	68.1
4	23.25	21.74	6.5	10.08	8.75	13.2	2.41	2.52	4.6
5	20.06	23.97	19.5	5.72	8.72	52.4	1.33	1.71	28.6
mean	21.09	22.76	7.9	8.33	9.95	19.4	1.87	2.49	33.2

질 I 등급으로의 향상은 용존무기질소의 경우 만 안쪽(정점 C1)에서 98.7%, 용존무기인의 경우 만 바깥쪽(정점 C3)에서는 60% 삭감해야 한다는 것을 알았다(Fig. 8(B)). 육상에서 유입되는 영양염 부하량과 현장농도 삭감을 고려했을 때, 만 안쪽(정점 C1)에서 용존무기질소의 57.2%, 만 바깥쪽(정점 C3)에서 용존무기인의 38.4% 삭감할 경우 수질이 I 급으로 향상되었다(Fig. 8(C)). 따라서 만 안쪽(정점 C1)에서 영양염이 고농도로 출현하고 있는 것은 영양염의 육상 부하뿐만 아니라 현장에 누적된 영양염의 효과이며, 만 바깥쪽(정점 C3)에서는 영양염의 육상 부하량보다 현장농도에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다.

또한 육지로부터의 영양염 부하량과 현장농도를 어느 정도로 소감하면, 적조발생 환경을 해소시킬 수 있는지 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 영양염을 육상부하량 및 관측값으로부터 10%씩 삭감할 경우,

chlorophyll a 농도가 $3.2 \mu\text{g/l}$ (식물플랑크톤의 개체농도가 10,000 cell/ml) 이상에서 발생하는 어떤 적조를 해소할 수 있는가를 파악하기 위하여 육상부하의 영향이 큰 만 안쪽(정점 C1)과 상대적으로 영향이 작은 만 바깥쪽(정점 C3)에서 조사하였다. 먼저 육상부하량을 조절하였을 때 만 바깥쪽(정점 C3)에서의 chlorophyll a 농도변화는 거의 나타나지 않았으며, 만 안쪽(정점 C1)에서 90.5% 부하량을 삭감할 경우 chlorophyll a 농도가 $3.2 \mu\text{g/l}$ 이하로 나타났다(Fig. 9(A)). 현장의 영양염농도를 96.6% 삭감하였을 경우, 만 바깥쪽(정점 C3)에서 chlorophyll a가 $3.2 \mu\text{g/l}$ 이하의 농도 분포가 나타났으나, 만 안쪽(정점 C1)에서의 변화는 거의 볼 수가 없었다. 한편 영양염의 육상부하량 및 현장농도를 동시에 삭감하였을 경우, 만 안쪽(정점 C1)에서는 86.5%, 만 바깥쪽(정점 C3)에서는 약 93% 삭감하여야만, chlorophyll a 농도가 $3.2 \mu\text{g/l}$ 이하까지 저하되어 어떤 적조가 해

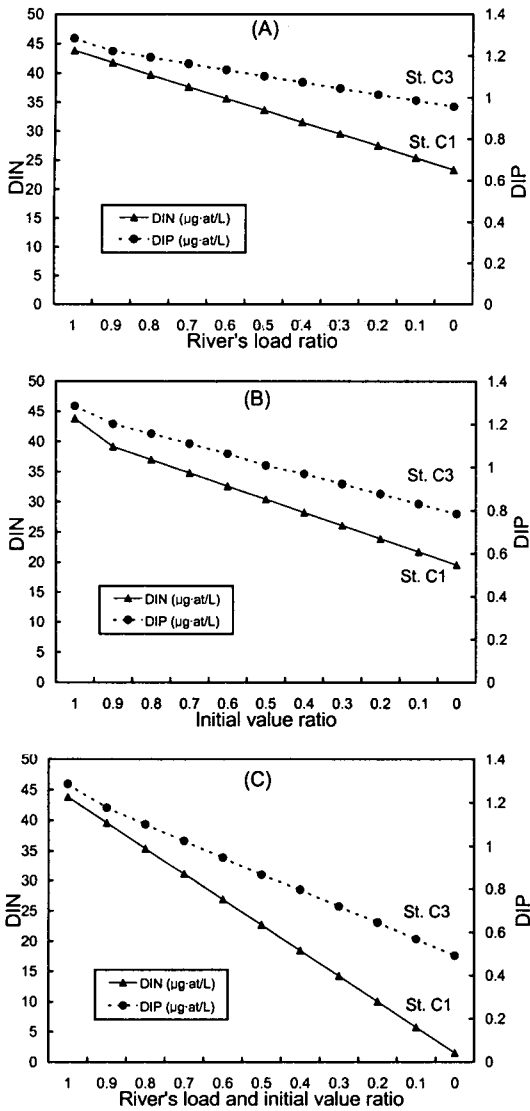


Fig. 8. Change of the concentration of DIN in the upper layer at the head of bay(St. C1) and DIP in the lower layer at the mouth of bay(St. C3). (A) is shown the effect of river's load from land, (B) is the effect of the initial value(field concentration) and (C) is the effect of river's load and the initial value(field concentration).

소될 수 있다는 것을 알았다.

이상으로 하계 진동만에서 발생하는 부영양화는 주로 육상에서 유입되는 부하량 및 현장농도 특히 저층에 누적된 영양염에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서 부영양화를 해소 시킬수 있는 방안으로는 육상부하를 줄 일수 있는 하수종말 처리장의 설치

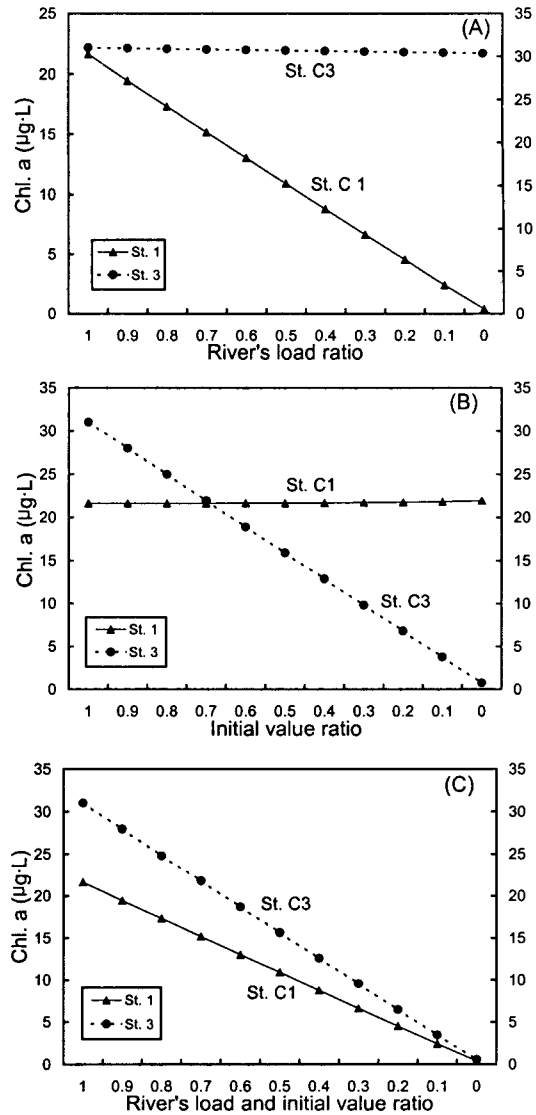


Fig. 9. Change of the concentration of chlorophyll a in the upper layer at the head of bay(St. C1) and the mouth of bay(St. C3) to decreasing nutrients from land load and field concentration. (A) is shown the effect of river's load from land, (B) is the effect of the initial value(field concentration) and (C) is the effect of river's load and the initial value(field concentration).

나 유기적으로 오염된 해저퇴적물을 개선시키는 방법이 있다. 그러나 진동만과 같이 육상에서 유입되는 영양염 부하를 필요수준까지 줄일 수 있는 하수처리시설이 없는 경우에는 해수중에서 식물플랑크톤의 밀도를 감소시킬 수 있는 생물학적인 활동에

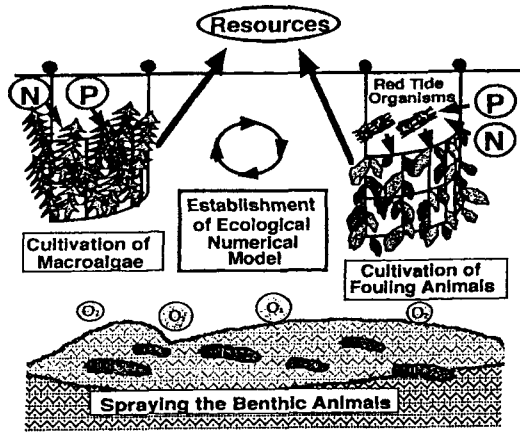


Fig. 10. A schematic view of 'eco-remediation method' to improve the environmental conditions in an enclosed bay with extremely eutrophicated water(after Yanagi *et al.*, 1999)²⁰⁾.

대한 기술개발이 필요하다.

인접국 일본에서는 해수중에 TN(총질소)과 TP(총인)에 대해서 생태계모델로써 부영양된 해수와 유기적으로 오염된 해저 퇴적물을 개선하기 위하여 새로운 생태계 기술방법 개발과 이런 연구에서 얻을 수 있는 생물로부터의 수산물 생산하기 위한 새로운 기술의 개발이 1994년부터 "Eco-Remediation Method Project"라는 연구를 시행하고 있다(Fig. 10)²⁰⁾. 춘계에서 추계까지 일본 북큐슈 Dokai 만에서는 자주 적조생물의 bloom이 발생하고 있으며, *M. galloprovincialis*와 같은 홍합류(mussel) 등이 연안의 암초에 부착하여서 식물플랑크톤을 섭취하기 위하여 잠재적으로 서식하고 있다. 따라서 해수에서 식물플랑크톤의 밀도를 감소시키는 이런 생물학적인 활동에 대한 적용을 시도하고 있으며, Dokai 만의 경우 홍합류와 같은 조개가 약 1,000ton이 양식되어야 부영양화에 의한 적조출현이 방지된다는 것이 예측되었다²⁰⁾. 또한, 퇴적물의 화학적인 조건에서 가장 오염된 지역에서 우점종인 저서생물의 생물학적인 영향들에 대한 최근의 연구들은 유기물질의 재분비나 효율적으로 퇴적물의 유기물 오염을 저감시키는 방법으로 진행되고 있다²¹⁾. 따라서 진동만에서 부영양화를 감소시킬 수 있는 방법으로 우점종인 저서생물의 조밀한 path를 인위적으로 설치하여 퇴적물에 대한 생물학적인 영향들을 향상시키고 동계에 이 종의 급속한 개체수의 증가를 향상시켜 퇴적물의 유기물 오염을 감소시키는 방법도 가능할 것이다. 수치생태계모델은 적조생물이나 만에서의 용존영양염의 섭취를 뚜렷하게 진척시키

는 대형조류(macro algae) 양식능력을 결정할 뿐만 아니라 만의 수질을 개선시키는 행정정책을 수행하는데 필요하다.

4. 결론

진해만의 북서쪽에 위치한 진동만은 매년 하계에 적조가 상습적으로 발생하는 해역이다. 부영양화 및 적조발생억제를 위한 저차생태계모델을 개발하여, 육상에서의 부하량 및 현장농도 삭감에 따른 환경관리기법으로의 이용에 대한 연구를 시도하였다.

하계 진동만 안쪽(정점 C1)에서의 용존무기질소는 해역의 수질환경기준 II등급(DIN: 42.6 $\mu\text{g} \cdot \text{at/l}$ 이하) 수준이며, 만 바깥쪽(정점 C3) 저층에서의 용존무기질은 III등급(DIP: 2.90 $\mu\text{g} \cdot \text{at/l}$ 이하)의 수질을 보이고 있다. 이러한 현상은 육상에서 유입되는 영양염과 현장의 저층에 누적된 영양염의 영향으로 사료된다.

육상에서 유입되는 영양염 부하량과 현장농도 삭감을 동시에 고려했을 때, 만 안쪽(정점 C1)에서 용존무기질소의 57.2%, 만 바깥쪽(정점 C3)에서 용존무기질소의 38.4% 삭감할 경우 수질이 I등급으로 향상되었다.

영양염의 육상부하량 및 현장농도를 동시에 10%씩 삭감할 경우 chlorophyll a 농도가 3.2 $\mu\text{g/l}$ (식물플랑크톤의 개체농도가 10,000cell/ml) 이상에서 발생하는 어떤 적조를 해소하려면, 만 안쪽(정점 C1)에서는 86.5%, 만 바깥쪽(정점 C3)에서는 약 93% 영양염을 삭감해야 한다.

진동만에서 발생하는 부영양화는 주로 육상에서 유입되는 부하량과 현장의 영양염 누적에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서 부영양화를 해소시킬 수 있는 방안으로는 육상부하를 줄일 수 있는 하수종말 처리장의 설치나 유기적으로 오염된 해저퇴적물을 개선시키는 방법이 있다. 그러나 진동만과 같이 육상에서 유입되는 영양염 부하를 필요수준까지 줄일 수 있는 하수처리시설이 없는 경우에는 해수중에서 식물플랑크톤의 밀도를 감소시키거나 영양염을 감소시킬 수 있는 생물학적인 활동에 대한 기술개발이 필요하다. 또한, 오염된 퇴적물의 유기물질의 재분비나 효율적인 퇴적물의 유기물 오염 저감을 위한 우점종인 저서생물의 생물학적인 영향에 대한 연구도 필요하다.

참고문헌

- 1) Yanagi, T., 1999, Coastal oceanography, Ocean Sciences Research, 162pp.
- 2) 김동선, 조규대, 박청길, 2000, 적조다발지역인 진

- 동만의 해양환경 특성, 10(2), 159-166.
- 3) Fleming, R. H., 1939, The control of diatom populations by grazing, *J. Cons. Perm. Expl. Mer.*, 14, 221-227.
 - 4) Riley, G. A., 1947, A theoretical analysis of the zooplankton population of George Bank, *J. Mar. Res.*, 6, 104-113.
 - 5) Riley, G. A., 1942, The relationship of vertical turbulence and spring diatom flowerings, *J. Mar. Res.*, 4, 162-171.
 - 6) Ikeda, S. and M. Kishi, 1986, Population dynamics of red tide organisms in eutrophicated coastal waters-numerical experiment of phytoplankton bloom in the East Seto Inland Sea, Japan, *Ecological Modeling*, 31, 145-174.
 - 7) Yanagi, T., T. Shimizu and T. Matsuno, 1996, Baroclinic eddies south of Cheju Island in the East China Sea, *J. Oceanogr.*, 52, 763-769.
 - 8) Guo, X. and T. Yanagi, 1998, The role of the Taiwan Strait in an Ecological Model in the East China Sea, *ACTA OCEANOGRAPHICA TAIWANICA*, 37(2), 139-164.
 - 9) James, E. C. and T. C. Ralph, 1980, Simulation model of *Skeletonema costatum* population dynamics in northern San Francisco Bay, California, *Academic Press Inc. (London) Ltd.*, 83-100.
 - 10) Kawamiya, M., M. J. Kishi, Y. Yamanaka and N. Suginozono, 1995, An ecological-physical coupled model applied to Station papa, *J. Oceanogr.*, 51, 635-664.
 - 11) 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.
 - 12) Yamaguchi, N., 1991, The growth characteristics of diatom, in Report of ecological measure for the toxic red tide, Nansei National Fisheries Institute, 55-66.
 - 13) Corner, E. D. S., R. N. Head and C. C. Kilvington, 1972, On the nutrition and metabolism of zooplankton VIII. The grazing of *Biddulphia* cell by *Calanus helgolandicus*, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 52, 847-861.
 - 14) 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.
 - 15) Uye, S. and M. Yashiro, 1988, Respiration rates of planktonic crustaceans from the Inland Sea of Japan with special reference to the effects of body weight and temperature, *J. Oceanogr.*, 44, 47-51.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 환경부, 과학기술처, 1995, 부영양화 및 적조현상 규명에 관한 연구, 해양환경관리기술, 제3차년도 최종보고서, 국립수산진흥원.
 - 19) Kim, D.S., K.D. Cho and C.I., Lee, 2002, Numerical model reflecting effect of local wind in the inner bay, *Fisheries Science*, 68 (1), 554-557.
 - 20) Yanagi, T., M. Yamada and M. Suzuki, 1999, A challenge of water purification in Dokai bay, Japan, *Marine Pollution Bulletin*, 38, 1063-1069.
 - 21) Chareonpanich, C., H. Tsutsumi and S. Montani, 1994, Efficiency of the decomposition of organic matter, loads on the sediment, as a result of the biological activity of *Capitella* sp I, *Marine Pollution Bulletin*, 28, 314-318.