

진해만 적조에 있어서 수치모델링에 의한 Chl-*a*의 공간적 집적과 확산 평가

이대인[†]

부경대학교 환경시스템공학부

Estimation of Spatial Accumulation and Transportation of Chl-*a* by the Numerical Modeling in Red Tide of Chinhae Bay

Dae-In Lee[†]

*Division of Environmental System Engineering, Pukyong National University,
599-1 Daeyon-Dong, Nam-Gu, Pusan 608-737, Korea*

요 약

진해만 해역에 있어서 적조발생역과 물질집적공간을 진단하기 위해서 수치모델링에 의해 하계 적조가 발생했을 때 환경요인의 변동에 따른 Chl-*a* 분포와 물리과정의 기여도를 평가하였다. 해수유동모델에 의한 표층 잔류류는 무풍시와 풍속 2 m/sec이하일 때 진해만 서부해역과 동부해역에서 각각 남향과 북향 하는 흐름이 상접하는 공간이 예측되었고, 풍속이 강해질 때는 유속도 강해지고 유향도 크게 달라지는 것으로 나타났다. 생태계모델에 의해 하계 Chl-*a*를 예측한 결과, 진해만과 가덕수로 북단의 인근 해역에서는 20 mg/m³ 이상으로 매우 높았고, 서부해역에서도 대부분 10 mg/m³ 이상으로 진해만은 전역에서 하계에는 적조발생 가능성이 매우 높은 것으로 예측되었다. 현 상황에서 Chl-*a* 현존량에 대한 물리과정량을 평가한 결과, 동부해역의 가덕수로 북단과 칠천도 주변, 서부해역의 진동만 내측 그리고 가조도 서쪽 지역에서 물리과정량이 (+)로 계산되어 물질의 집적이 일어날 가능성이 큰 공간으로 평가되었고, 마산만, 행암만, 진동만, 원문만 및 고현만 등에서는 물리과정량이 (-) 즉, 발산지역으로 나타나서 물리과정량 보다는 생물학적인 증식과정이 큰 기여를 하는 것으로 고려되었다. 모델링과 현장관측자료 분석결과, 진해만 해역에 있어서 적조의 초기발생역은 마산만과 행암만으로 나타났다. 풍속의 증가는 Chl-*a*의 농도를 감소시키지만 물리적으로 집적하는 공간의 확대를 야기시키는 것으로 예측되었고, 동남풍 계열보다는 북서풍 계열이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일사량 및 일조시간의 변동은 물리적 집적공간의 분포에는 큰 영향이 없었지만, Chl-*a*의 급격한 증감을 초래하는 것으로 시뮬레이션되었다. 육상오염부하량 자체만의 변동으로는 Chl-*a*를 적조발생 가능농도이하로 감소시키지는 않는 것으로 모델링되었다.

Abstract – The summer distribution of Chl-*a* and physical processes for simulating outbreak region of red tide were estimated by the Eco-Hydrodynamic model in Chinhae Bay. As a result of simulation of surface residual currents, the southward flow come in contact with the northward flow at the inlet and western part of bay in case of windlessness and below wind velocity 2 m/sec. As wind velocity increases, the velocity and direction of currents were fairly shifted. The predicted concentration of Chl-*a* exceeded 20 mg/m³ in Masan and Haengam Bays, and most regions were over 10 mg/m³, which meant the possibility of red tide outbreak. From the results of the contributed physical processes to Chl-*a*, accumulation sites were distributed at the northern part of Kadok channel, around the Chilcheon island, the western part of Kajo island and some area of Chindong Bay. On the other hand, inner parts of the study area such as Masan Bay were estimated as the sites of strong algal activities. Masan and Haengam Bay are considered as the initial outbreak region of red tide by the modeling and observed data, and then red tide expanded to other areas such as physical accumulation region and western inner bay, as depending on environmental variation. The increase of wind velocity led to decrease of Chl-*a* and enlargement of accumulation region. The variation of intensity of radiation and sunshine duration caused to rapidly fluctuation of Chl-*a*: however, it was not largely affected by the variation of pollutant loads from the land only.

Keywords: Chinhae Bay(진해만), Eco-Hydrodynamic Model(생태-유체역학 모델), Red tide(적조), Chl-*a*(엽록소 *a*), Environmental variation(환경변동), Accumulation and transportation(집적과 수송)

[†]Corresponding author: dilee@mail1.pknu.ac.kr

1. 서 론

진해만은 피조개, 굴과 진주담치 등 각종 어패류 양식장으로 이용되고 있어서 수산자원생물의 보호가치가 높은 해역(水産廳과 國立水産振興院[1988])이지만, 최근 수질이 악화되어 적조가 가장 빈발하고 그로 인한 피해를 많이 입는 지역이기 때문에 적절한 수질관리 및 적조대책이 필요한 실정이다(金[1994]; 國立水産振興院[1997]). 이러한 배경하에서 부영양화 및 적조발생의 규명에 관계된 이화학적 메카니즘 연구와 생물학적 그리고 물리화학적 종합적이고 지속적인 모니터링과 조사가 활발히 수행되어 왔다(박[1982]; 國立水産振興院[1995]). 그러나, 대부분의 연구가 현상과 악과 생물에 미치는 영향 및 사후억제대책에 집중되어 있어서, 발생원인과 예측에 관한 연구는 많이 부족해서 좀 더 집중적이고 세밀한 연구조사가 필요하다 하겠다.

주지하는 바와 같이, 적조발생은 두 가지로 생각할 수 있는데, 첫째는 해역 그 자체에서 발생된 형태로서 식물플랑크톤 등 적조원인생물이 급속하게 증식할 수 있도록 환경요인이 충족된 상태에서 가능하고, 다른 하나는 이류·확산작용에 의해 식물플랑크톤이 고농도로 형성된 초기발생역에서 이동된 형태로 구분할 수 있을 것이다. 전자는 적조원인의 규명 즉, 원인생물 및 초기발생역의 환경파악에 연구초점이 되고, 후자는 이동·확산 등 물리화학적 과정이 연구초점이 된다. 현재로서는 적조의 발생과 이동 예측은 변수가 많고 급변적이어서 대단히 어려운 것 또한 사실이다. 그러나, 해마다 반복되는 적조피해를 생각해 볼 때 각 해역의 적조발생의 원인규명 및 확산예측은 무엇보다도 중요한 과제라 할 수 있다. 이를 위한 연구로서 어떤 해역에 있어서 공간적으로 식물플랑크톤의 농밀한 군집의 형성에 물리적인 과정과 생물화학적 과정이 어떻게 관여하고 기여하는지에 대한 평가는 매우 중요한 측면이고, 또한 오염부하 및 기후 등 환경변동에 따라서 식물플랑크톤의 분포와 Patch형성 가능지역을 예측하는 것은 의미있는 접근일 것이다. 이러한 적조의 시·공간적 예측에는 수질자료를 바탕으로 수행하는 통계적인 접근(이와 백[1998])도 있지만, 동일한 해역내에서도 수질특성 및 물질분포가 차이나기때문에 공간적인 분포상황을 모의할 수 있고 환경변동에 따른 물질분포를 예측할 수 있는 격자형 저차생태계 수치모델이 아주 유용한 도구이다(岸道郎 등[1985]; 柳哲雄 등[1993]). 국내에서 수치모델을 이용해서 적조의 이동 및 확산에 관해서는 주로 물리적인 관점에서 연구(권과 조[2002])되었고, 그리고 일부 해역에서 식물플랑크톤의 극대역 변동에 관한 수치시뮬레이션 연구(이[2000])가 있었지만, 적조가 다발하는 폐쇄성 내만에서 적조의 초기발생역 평가와 물리과정의 기여도 평가 및 환경변동에 따른 예측에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 논문은 3차원 해수유동모델과 식물플랑크톤을 중심으로 한 저차생태계모델을 연계하여 진해만에 있어서 적조발생을 진단하였다. 이것을 위해 첫째, 해수유동모델을 이용하여 무풍조건과 하계 탁월풍향·풍속의 변동에 따른 잔차류를 시뮬레이션하였고 둘째, 생태계모델을 이용해서 Chl-*a*의 분포 및 그에 따른 물리적인 과정에 의한 집적과 확산을 공간적으로 평가하여 적조의 초기발생역을 진단하였고, 마지막으로 이러한 각 과정에 대해 바람, 일사량 및 하천의 오염부하량 등 외부환경요인의 변동에 따른 영향을 평가해서 적조발생역의 이해와 예측을 위한 연구에

기여하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 수치모델링 영역과 현장조사

본 연구의 수치모델링 영역을 진해만으로 설정하였고 현장관측한 시기와 환경특성의 차이에 따른 해석을 세분화할 목적으로 공간적으로 진해만 서부해역(A구역), 진동만 해역(B구역) 및 진해만 입구부근인 동부해역(C구역)으로 분할하였다(Fig. 1). 물리·생지화학적 현장조사는 1997년부터 1999년까지 세부구역별로 주기적으로 수행하였는데, 특히, A구역에서는 1999년 8월 12일, B구역에서는 1998년 7월 21일, 그리고 C구역에서는 1998년 7월 20일에 각각 실제 적조가 관측되었다. 식물플랑크톤의 현존량 지표인 Chl-*a*는 Fig. 1에 나타난 각 정점에서 동일시기에 적조발생시의 관측데이터가 없어서 위에 언급한 시간이 다른 적조발생시에 실측한 자료를 이용해서 생태계모델에 의한 적조발생에 관한 적용성을 검증하였다.

2.2 적용된 생태-유체역학 모델

본 연구에 적용된 생태-유체역학 모델(日本通商産業省[1991])은 해수유동 모의를 위한 층계모델(COSMOS 4th version)과 수질 모의를 위한 생태계모델(EUTRP 2nd version)로 구성되어 있는데, 해수유동모델을 이용하여 조석류와 잔차류를 모의하고 그 중 연안해역에서 장기간의 물질변동에 더 큰 영향을 미치는 잔차류성분을 생태계모델의 유동장으로 입력하여 수질인자를 예측하는 프로그램이다.

2.2.1 해수유동모델

이 모델은 조석이 침입하는 내만에서 밀도류계의 3차원 해석을 행할 수 있고 생태계모델을 위한 유동장으로도 이용할 수 있다(Nakata *et al.*[1985]). 유체의 운동에 대한 기본방정식은 운동방정식, 연속방정식, 자유표면방정식, 염소량 수지식, 열 수지식 및 해수의 밀도를 염소량과 수온과의 관계로 표현한 상태방정식으로 구성된다.

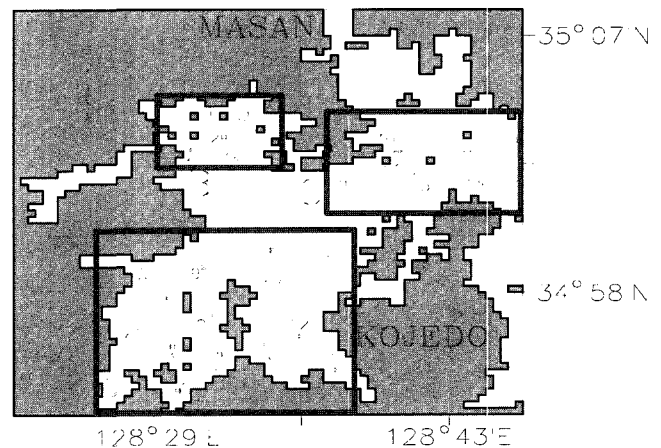


Fig. 1. The modeling area and research points.

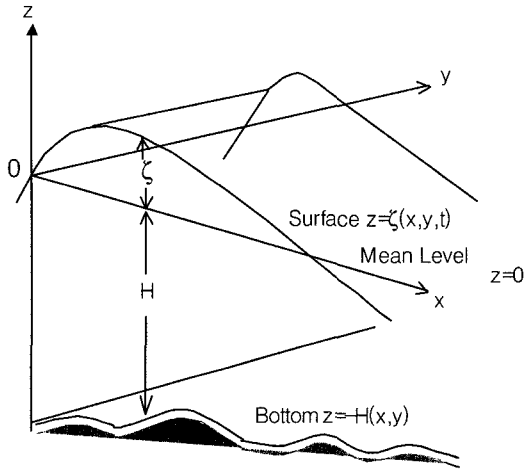


Fig. 2. The cartesian coordinate for a three-dimensional hydrodynamic model.

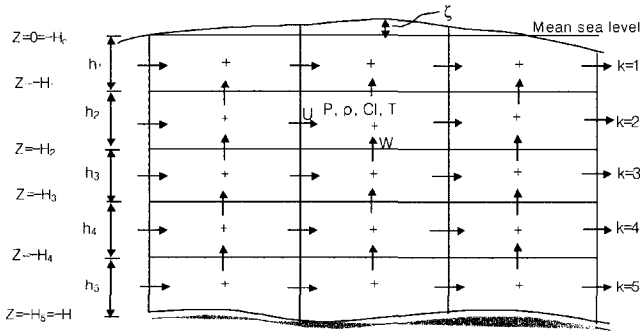


Fig. 3. The location of variables on the vertical grid of a three-dimensional hydrodynamic model.

모델을 정식화하기 위한 좌표계는 Fig. 2와 같이 평균 해면상에 x-y를, 연직방향에 z축을 가지고 있다. 연직방향의 층 구분과 변수의 위치는 Fig. 3과 같고 각 층내에서 유속, 온도, 염소량 등에 대한 평균화된 상태량을 계산한다.

2.2.2 생태계모델

Fig. 4는 저차생산자만을 대상으로 한 연안 해양생태계내 물질 순환으로서 탄소와 질소 및 인의 흐름을 나타낸 것이다. 본 생태계 모델은 구성요소로서 4개의 유기태 요소, 2개의 무기태 요소 및 2개의 수질 요소가 있는데, 유기태의 구성요소에는 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 현탁태 유기물(POM) 및 용존태 유기물(DOM)이 있고, 무기태의 구성요소에는 인산인(DIP)과 용존무기질소(DIN)가 있으며, 수질의 구성요소로서 용존산소(DO)와 화학적 산소요구량(COD)이 정의되어 있다. 저생생물이나 퇴적물 등으로 이루어진 해저계도 환경인자로서 취급하여 모델의 변수로 되어 있다.

해역의 임의의 지점에 있어 구성요소의 현존량 B의 시간에 따른 농도변화를 기술한 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{이류} + \text{확산} + \text{생물} \cdot \text{화학적 변화량}$$

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

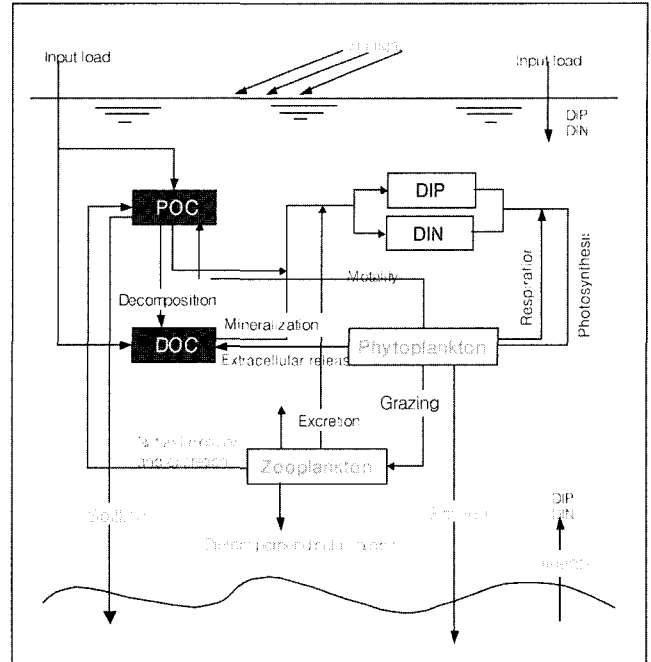


Fig. 4. The schematic diagram for the cycle of nutrients (N and P) in the marine ecosystem.

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right] + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, B는 구성요소의 현존량, t는 시간, u, v, w는 각각 x, y, z방향의 유속성분, K_x, K_y, K_z 는 각각 x, y, z방향의 외확산계수, $\frac{dB}{dt}$ 는 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 구성요소의 변화량이다. Eq. (1)의 확산방정식에서 만해 흐름에 의한 물질수송(이류)이 계산되므로 생태계모델은 층계유동모델과 연결되어 있다. 생태계모델의 구성요소 중 본 연구의 중심되는 식물플랑크톤의 현존량에 대한 수식화는 Eq. (2)와 같다.

$$\left(\frac{dP}{dt} \right) = \{ 1 - \mu_3(P) \} \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I) \cdot P - V_2(T) \cdot P - V_3(T) \cdot Z - V_4(T) \cdot P - W_p \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2)$$

여기서, P는 식물플랑크톤 현존량, t는 시간, μ_3 는 식물플랑크톤 세포외 분비항, $V_1(T)$ 는 식물플랑크톤 최대증식속도항, μ_1 (DIP, DIN)는 식물플랑크톤의 영양염에 의한 성장제한항, $\mu_2(I)$ 는 식물플랑크톤의 광-광합성 응답항을 나타내고, $V_2(T)$ 는 식물플랑크톤의 호흡항, $V_3(T) \cdot Z$ 는 동물플랑크톤에 의한 섭취항, $V_4(T)$ 는 식물플랑크톤의 자연사망항, $W_p \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$ 는 식물플랑크톤의 침강플럭스항을 나타낸다.

2.3 모델의 입력데이터

대상해역의 모델격자는 진해만과 부산 수역만에 이르는 광역해역에서 적용된 격자중에서 진해만에 초점을 맞추었다(이 등(2000)). 개방경계로는 견내량수도(D)와 해운대, 거제도의 장승포남단을 각각으로 연결한 선(A-C)으로 설정하였다.

Table 1. Input data for a hydrodynamic model.

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 500$ m
Total mesh value	$154 \times 63 \times 3 = 29106$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	10 sec
Level	1 : 05 m 2 : 515 m 3 : below 15 m
Tidal level and degree at open boundary	A : 28.48 cm, 228.20° B : 37.99 cm, 243.90° C : 49.90 cm, 242.70° D : 65.20 cm, 242.60°
Water temp. and chlorinity at open boundary	Level 1 : 22.10°C, 17.10‰ Level 2 : 21.20°C, 16.66‰ Level 3 : 21.20°C, 17.27‰
Coriolis coefficient	$f = 2 \omega \sin \phi$
Surface friction coefficient	0.0013
Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity coefficient and Horizontal diffusion coefficient	Level 1 : 1.0E6(cm ² /s) Level 2 : 1.0E5(cm ² /s) Level 3 : 1.0E4(cm ² /s)
Vertical diffusion coefficient	Level 13 : 0.1(cm ² /s)
Calculation time	10 tidal cycles

2.3.1 해수유동모델

모델영역내의 해수유동을 재현하기 위해서 입력한 자료는 실측치와 각종 문헌(Nakata *et al.*[1985]; 金[1994]; 김 등[1996])을 참고로 해서 Table 1에 나타내었다. 탁월분조인 M2분조를 이용하고 해저마찰계수는 심해의 최적치로서 일반적으로 해의 안

정성을 주는 $R=0.0025$ 를 적용하였으며, 수평확산계수는 표층에서는 $1.0 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{sec}$, 중층의 경우는 $1.0 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$, 그리고 저층의 경우는 $1.0 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다. 연직확산계수의 경우는 1층에서 3층까지 $0.1 \text{cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다. 또한 Coriolis coefficient가 위도에 따라서 일정한 f-plane을 이용하였다.

2.3.2 생태계모델

생태계모델에 사용된 초기치와 경계치도 실측치와 문헌값을 토대로 Table 2와 같이 공간적인 분포를 고려하여 입력하였다. 물질의 수평 및 연직확산계수는 유동모델에 적용된 동일한 계수값을 사용하였다. 본 연구의 모델영역내로 유입되는 화학적산소요구량, 용존산소, 용존무기인, 용존무기질소, 입자성유기탄소 및 용존성유기탄소의 육상오염부하량은 國立水産振興院[1995]과 같고, 대기로 부터의 유입부하 등 비점오염부하는 고려하지 않았다. 대상해역내의 저질 영양염용출량은 암모니아는 $14.87 \sim 36.37 \text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 를, 인산인은 $7.04 \sim 9.90 \text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 해역별 특성을 고려해서 입력하였다. 확산계수 및 그 밖의 모델에 입력되는 주요한 파라메타의 정의와 입력된 값은 실측치와 문헌(USEPA[1985]) 등을 참조하여 Table 3에 제시하였다.

특히, 본 연구에 적용된 생태계모델은 기존의 생태계모델을 수정·보완하였다. 기존의 생태계모델은 수괴특성이 일정한 해역에 적용되도록 개발되어 응용되어 왔는데, 그러나 본 연구에서는 광역해역의 상이한 수질환경특성을 고려하기 위해서 다음과 같이 수정·보완된 모델을 적용하였다. 첫째, 생태계모델의 구성요소의 초기치를 실측치를 토대로 공간적 분포와 수심별 분포를 고려해서 입력할 수 있도록 프로그램의 입력방식을 수정하였다. 둘째, 생태계모델의 시뮬레이션 시 각종 parameter를 보정하는 인자로 작

Table 2. Input data for an ecological model.

Parameters		Input values							
Initial condition for compartments									
Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	(mg/L)		($\mu\text{g-at/L}$)			(mg-C/m ³)			
1	5.77~12.09	0.58~8.18	0.07~3.27	0.23~176.39	132.35~2000.00	1170.00~3255.00	27.90~1081.60	50.00	
2	4.39~9.63	1.28~5.76	0.13~2.92	0.09~61.82	125.20~500.00	780.00~2719.00	28.40~596.70	50.00	
3	1.62~8.83	1.08~5.64	0.15~2.06	4.37~40.29	74.05~500.00	800.00~2558.00	6.00~393.60	100.00	
Boundary condition for compartments									
Level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	(mg/L)		($\mu\text{g-at/L}$)			(mg-C/m ³)			
A~C	1	9.29~10.66	1.75	0.07~0.26	0.23~2.09	132.35	2570.00	27.90~276.20	50.00
	2	8.21~9.03	1.50	0.16~0.58	0.09~8.61	125.20	2575.00	28.40~75.60	50.00
	3	7.70~8.83	1.42	0.32~0.55	4.37~14.27	74.05	1370.00	6.00~12.00	100.00
	1	8.95	1.92	0.39	9.53	2460.00	2540.00	127.80	50.00
D	2	4.52	2.07	0.83	5.65	2010.00	2595.00	95.30	50.00
	3	1.36	1.91	1.16	7.40	1560.00	2650.00	62.30	100.00
Horizontal viscosity coefficient and Horizontal diffusion coefficient	Level 1 : 1.0E6(cm ² /s) Level 2 : 1.0E5(cm ² /s) Level 3 : 1.0E4(cm ² /s)								
Vertical diffusion coefficient	Level 1~3 : 0.1(cm ² /s)								
Water Temp. and Sal.	Level 1 : 22.4725.46°C, 3.3834.02 psu Level 2 : 17.2222.47°C, 28.4234.11 psu Level 3 : 13.6019.91°C, 29.9734.45 psu								
Calculation time	200 tidal cycles								

Table 3. Input data of the major biological parameters used in an ecological model.

Symbol	Unit	Definition	Input values
α_1	day ⁻¹	Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	0.3001.400
α_2	day ⁻¹	Respiration rate of phytoplankton at 0°C	0.010
α_3	day ⁻¹	Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	0.050.18
α_4	day ⁻¹	Death rate of phytoplankton at 0°C	0.015
α_5	day ⁻¹	Natural death rate of zooplankton at 0°C	0.050
K_{SP}	μg-at/L	Half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ -P at 0°C	0.0240.150
K_{SN}	μg-at/L	Half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	0.4001.100
k_0	m ⁻¹	Dissipation coefficient of light independent of Chl. <i>a</i>	0.570
γ	m ⁻¹ (mg Chl. <i>a</i> /m ³) ⁻¹	Constant of dissipation coefficient depending on Chl. <i>a</i>	0.0179
μ	%	Digestion efficiency of zooplankton	70.0
λ	%	Total growth efficiency of zooplankton	30.0
W_p	m/day	Settling velocity of phytoplankton	0.350
[P:C _p]	weight ratio	Ratio of P/C for phytoplankton	3.500E-4
[N:C _p]	weight ratio	Ratio of N/C for phytoplankton	1.171E-3
[TOD:C _p]	weight ratio	Ratio of TOD/C for phytoplankton	3.470E-3
[COD:C _p]	weight ratio	Ratio of COD/C for phytoplankton	1.535E-3
[Chl- <i>a</i> :C _p]	weight ratio	Ratio of Chl- <i>a</i> /C for phytoplankton	0.032

용하는 수온과 염분을 실측치를 토대로 공간적, 수심별로 다르게 입력할 수 있도록 수정하였다. 세째, 기존에는 전 대상해역을 통해서 단일한 식물플랑크톤 우점종을 고려해서 그 한 종에 관계된 각종 parameter를 입력했는데, 본 연구에서는 식물플랑크톤의 실측자료를 바탕으로 적조발생인 종과 우점종 조성분포를 파악해서 복수종을 고려할 수 있도록 식물플랑크톤에 관계된 중요한 parameter의 입력방식을 수정·보완하였다. 즉, 식물플랑크톤 최대성장속도 (α_1)(Jorgensen[1979]), 식물플랑크톤 영양염 반포화상수(K_{SP} , K_{SN})(Eppley *et al.*[1973])를 식물플랑크톤 우점종조성에 따라 공간적으로 다르게 입력하였다. 네째, 동물플랑크톤도 서로 다른 종조성을 고려하여 동물플랑크톤 섭식속도(α_3)(Beca and Arnett[1976])를 다르게 입력할 수 있도록 수정하였다. 다섯째, 저질 영양염용출량을 기존의 실측된 자료를 바탕으로 공간적 분포를 고려해서 입력할 수 있도록 보완하였다. 여섯째, 모델영역내의 각각의 격자점에서 생태계모델의 구성요소에 기여하는 계산된 물리과정량을 외부자기파일로 출력할 수 있도록 프로그램을 보완하였다. 즉, 생태계모델에 의해 대상해역의 각 격자점에서의 계산된 식물플랑크톤 현존량에 대한 물리과정의 기여율이 증가(+)-되는 항은 물리적인 집적과정이라 판단되고, 감소(-)-되는 항은 반대로 물리적 과정에 의해 어떤 공간에서 확산된다고 할 수 있다. 그리고 비율이 0이 되는 곳은 물리적으로는 확산과 집적이 평형을 이루고 있는 장소로 평가하였다. 또한, 대상해역에 있어서 식물플랑크톤에 영향을 미치는 여러 가지 요인중에서 기상환경요인과 영양염류의 변동에 밀접히 관련된 육상오염부하의 영향에 초점을 맞추었다. 즉, 하계 탁월풍향과 풍속 및 일사량과 일조시간(기상청[2000]; 기상청[2001]) 그리고 육상의 오염부하량 변동을 고려하여 Chl-*a* 분포 및 물리적 과정에 미치는 영향을 평가하였다. 그 밖에 본 연구에 적용된 구체적인 해수유동모델과 생태계모델의 개요 및 수식화와 입력인자 등에 대한 자세한 설명은 참고문헌으로 제시하였다(김 등[1996]; 이[2000]; 이 등[2000]; 이 등[2001]; 이 등[2002]).

3. 결과 및 고찰

3.1 해수유동모델링 결과

해수유동모델에 의해 시뮬레이션된 해수유동결과가 실제의 유동상황과 맞는지 알아보기 위해서 Fig. 1의 정점 EC5에서 실측된 조류타원도와 시뮬레이션된 조류타원도를 비교한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 비록 조사시기와 비교할 만한 실측된 자료가 부족해서 한 정점에서의 결과이지만, 유속과 유향면에서 거의 일치하는 것으로 보아 대상해역의 유동상황을 어느 정도 재현하는 것으로 판단되었다. 생태계모델의 유동장으로 입력되는 하계의 잔차류 표층분포는 Fig. 6의 A와 같이 바람을 고려하지 않았을 때는 유속의 범위가 0.1~6.0 cm/sec로 진해만 중서부해역에서는 진동만내에서 남향하는 성분과 남측에서 북향하는 성분이 상접하여 거제도 와 칠천도쪽으로 치우치는 흐름이 나타났고, 진해만 입구인 동부해역에서는 마산만내에서 남향하는 성분과 가덕수로에서 북향하는 성분이 상접하는 패턴을 형성하는 것으로 시뮬레이션되었다. 이러한 상태에서 이 해역에 있어서 2000년 8월의 탁월풍향과 평균풍속인 동남동풍 1.6 m/sec를 입력했을 때는 B와 같이 유향과 유속은 큰 변화가 없었지만, 풍속을 5 m/sec로 증가했을 때는 C와 같이 유속은 최대 10 cm/sec로 훨씬 강해질 뿐만아니라 유향은 동부해역에서는 마산만쪽으로, 중서부해역에서는 진동만쪽으로 북상하는 흐름이 강하게 나타나는 것으로 예측되었다. 한편, 2001년 8월의 탁월풍향과 풍속인 서북서풍 1.4 m/sec를 고려했을 때는 D와 같이 A 및 C와 유사했지만, 풍속을 5 m/sec로 불게 했을 경우는 E와 같이 유속은 0.1~9.7 cm/sec범위로 동부해역에서는 마산만 쪽에서 가덕수로로 향하는 흐름이 강했고, 서부해역에서는 가조도 서쪽에서 북동향하는 성분과 진동만에서 남향하는 성분이 만나서 거제도 남서쪽으로 향하는 흐름이 나타나는 것으로 예측되었다.

이와 같이 본 해역에서는 풍속 약 2 m/sec이하에서는 무풍시와 유향과 유속면에서는 큰 차이가 없는 것으로 계산되었지만, 풍속

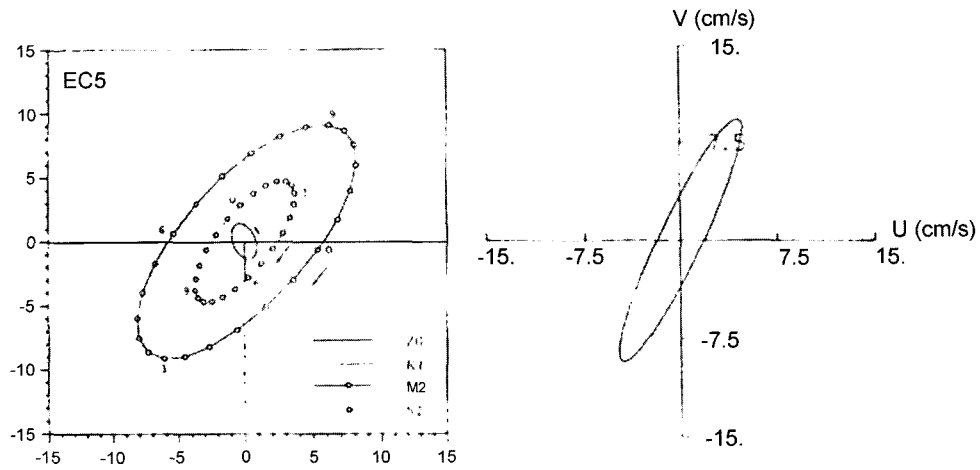


Fig. 5. The comparison of the tidal current ellipses between observed and computed result(left: observed, right: computed).

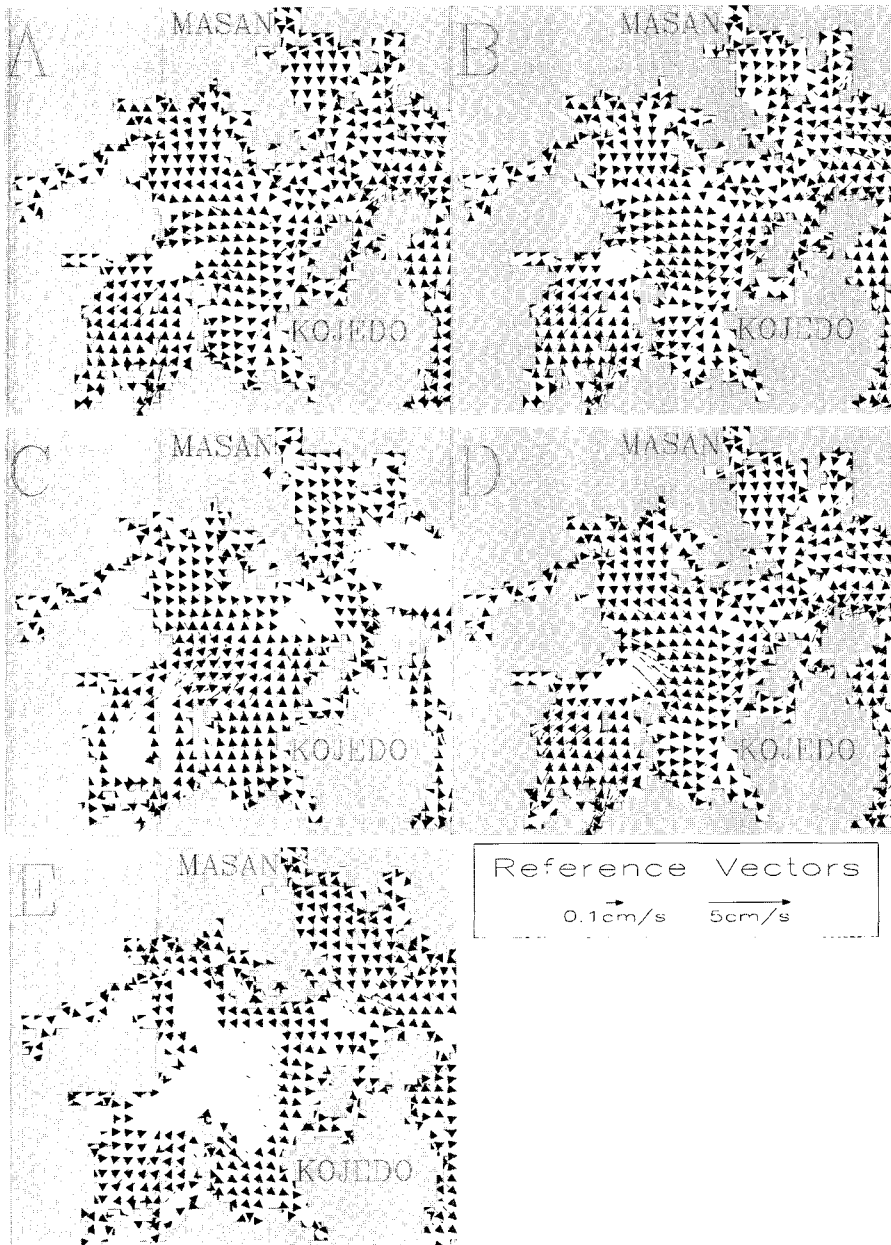


Fig. 6. Surface distribution of residual currents by the variation of wind direction and velocity(A: Windlessness, B: ESE of 1.6 m/sec, C: ESE of 5.0 m/sec, D: WNW of 1.4 m/sec, E: WNW of 5.0 m/sec).

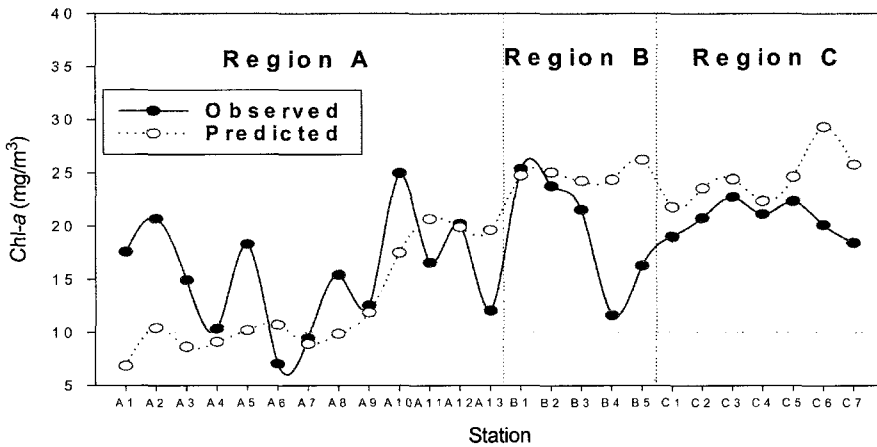


Fig. 7. Comparison of observed results with predicted Chl-a at surface level in the study.

이 강해질 때는 유속도 강해지고 유향도 크게 달라져서 만 전체의 물질분포 및 오염물질의 체류시간에 큰 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단되었다.

3.2 생태계모델의 적용성 검토

해수유동모델의 잔류유결과를 생태계모델의 유동장으로 입력하고 각종 파라메타들을 이용해서 보정단계를 수행후 해의 안정성을 확인하였다. 본 모델이 진해만 해역에서 하계 실제 적조가 발생했을 때의 상황을 어느 정도 예측할 수 있는가를 Chl-a의 분포로서 실측값과 예측값을 비교하는 것으로 생태계모델의 적용성을 검토하였다. 즉, A구역에서는 1999년 8월 12일, B구역에서는 1998년 7월 21일, 그리고 C구역에서는 1998년 7월 20일에 관측된 하계 적조실측결과와 각 정점의 표층에서 무풍시 조건으로 예측된 하계 평균값을 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 진해만 서부해역인 A구역에서는 예측치와 실측치의 상대오차가 1.6~62.7% 범위로 평균 32.9%를 나타내었는데, 가조도를 중심으로 서쪽 지역에서 매우 유사한 결과를 보였고 정점 1과 진해만 중앙해역 부근 정점인 13에서 상대적으로 높은 상대오차를 나타내었다. 진동만 해역인 B구역에서는 일직선상의 정점 1, 2와 3은 거의 10% 미만의 상대오차를 보였지만, 정점 4와 5에서는 60%이상의 상대오차를 보여 공간적으로 큰 차이를 나타내었다. 진해만 입구인 가덕수로 근처인 C구역에서는 다른 두 구역에 비해 평균 상대오차가 19.6%로 매우 낮은 실측치와의 편차를 나타내었다. 전체적으로 Chl-a에 대해 평균 30%정도의 상대오차를 나타내었는데, 상대오차만을 가지고 판단했을 때는 본 연구자 및 다른 연구자에 의해서 다양한 목적으로 연안해역에서 생태계모델의 적용성을 검토한 결과와 유사한 오차범위를 가지는 것으로 나타나서, 해석시 이러한 오차범위를 고려할 필요가 있을 것이다. 그러나, 세부적으로 볼 때, 세부구역의 몇몇 정점에서 예측치와 실측치가 경향과 절대값에 대해서 큰 차이를 유발하고 있는 것 또한 사실이다. 주지하는 바와 같이, 실제 해역에서 적조가 발생되었을 때의 수질은 공간적으로 매우 변동이 심하고 그 편차가 크게 나타난다. 이러한 급작스러운 변동상황을 모델로 세밀하게 재현하기란 쉽지 않다. 비록 본 모델이 기존의 모델에 비해 공간적인 변동상황을 좀 더 잘 나타내기 위해 주요 변수들의 입력방식을 수정·보완했음에도 불구하고, 이러한 오차를 유발한 것은 모델의 근본적 한계점을 내포하

고 있음을 의미할 수 있다. 즉, 본 모델이 주로 안정된 내만의 부영양화를 재현하는데는 그 적용성이 인정되어 왔지만, 본 연구와 같이 급작스런 환경변동을 초래하는 적조모델링에 있어서는 다소 약점을 갖고 있는 것으로 보인다. 또한 본 연구에 적용된 대상해역의 공간규모가 크기 때문에 몇몇 입력인자들을 제외하고는 모든 변수들이 공간적으로 일률적으로 적용한 것에서 나오는 오차도 포함되었을 것이다. 동일한 적조발생시간대에 관측한 데이터가 없어서 서로 다른 시점의 관측데이터로 예측치와 비교함에서 유발된 오차도 물론 포함되었을 것이다. 이러한 다양한 모델의 한계성과 오차유발요인을 감안하더라도 본 모델링에 의한 Region A에서 C로 갈수록 증가하는 실측패턴과 공간적인 평균값의 예측은 복잡한 연안생태계의 식물플랑크톤 계산에 있어서 어느 정도 적용성이 있다고 사료된다. 차후 앞서 언급한 문제점을 극복하고 좀 더 향상되고 신뢰성있는 적조모델링을 위해서는 입력변수들의 정확성과 검증할 관측데이터 신중한 처리를 도모해야 할 것이다. 물론, 기본적으로 예측도구의 세밀한 보완과 검증이 수행되어야 할 것이다. 즉, 준정상상태에서 동적모델로의 변환 등에 의해 실시간으로 예측해서 관측결과와의 비교에서 올 수 있는 시간적 오차를 줄여야 하겠고, 좀 더 효율적인 적조발생메카니즘을 고려한 생물과 물질흐름의 수식화를 보완해서 적조발생시물레이션의 신뢰성을 확보해야 할 것이다. 이러한 사항들을 종합해서 본 연구에 적용된 모델의 한계점을 인식할 필요가 있고 결과에 대한 신중한 해석을 기해야 할 것이다.

3.3 Chl-a 예측 및 물리과정량 평가

적용성을 검토한 생태계모델을 이용해서 연구해역의 각 구역에서 예측한 Chl-a의 공간적인 분포를 Fig. 8에 제시하였다. 일본수산환경수질기준(日本水産資源保護協會[1972])에 의하면 적조발생가능의 기준은 Chl-a 10 mg/m³ 이상이다. 진동만과 가덕수로 인근 해역에서는 20 mg/m³이상의 매우 높은 농도로 이 지역이 진해만내에서 적조다발지역으로 보고된 것과 유사한 분포를 나타내었다. 진해만 서부해역에서도 대부분 10 mg/m³이상으로 원문만과 고현만내에서 고농도를 나타내는 등 진해만은 전역에서 하계에는 적조발생 가능성이 매우 높다는 것을 뒷받침하였다.

이러한 상태에서 이류·확산 등의 물리적 영향에 의해서 물질이 어떤 공간에서 집적 또는 확산될 가능성이 큰 것인가를 Chl-a

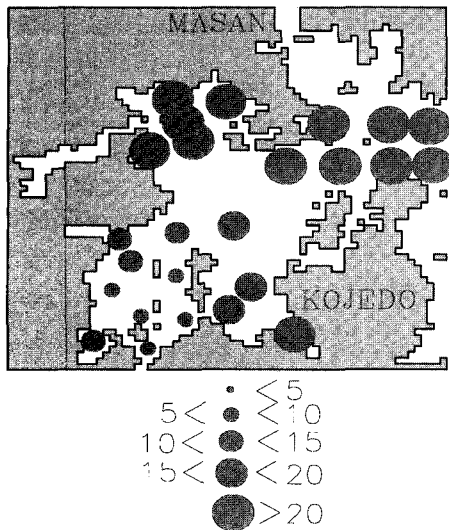


Fig. 8. Spatial distribution of simulated Chl-*a* (mg/m³).

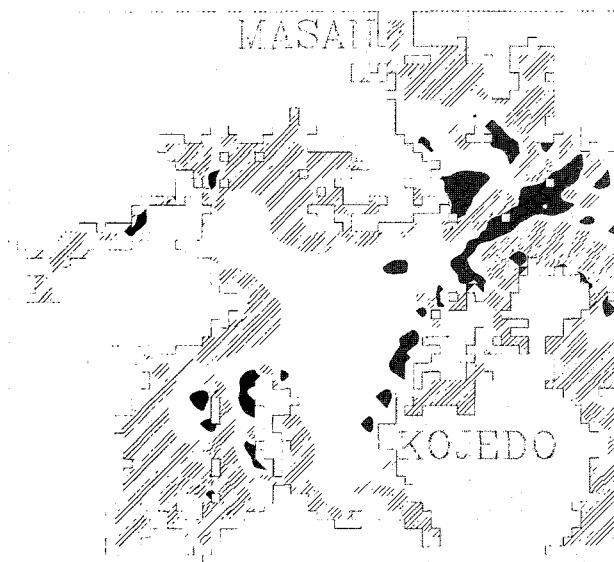


Fig. 9. The distribution of contributed physical process to Chl-*a* at surface level: filled area, accumulation; slanted area, transportation; blanked area, balance accumulation with transportation.

현존량에 대한 물리과정의 비율로서 평가한 것을 Fig. 9에 제시하였다. C구역에서는 가덕수로 북단과 칠천도, B구역인 진동만에서는 내측 일부지역에서 그리고 A구역인 진해만 서부해역에서는 가조도 서쪽지역에서 물리과정량이 (+)로 계산되어 물질의 집적이 일어날 가능성이 큰 공간으로 평가되었고, Chl-*a* 고농도지역과 거의 중첩되었다. 마산만, 행암만, 진동만, 원문만 및 고현만 등에서는 물리과정량이 (-) 즉, 발산지역으로 평가되었는데, 이러한 지역에서의 고농도의 Chl-*a*는 물리과정보다 생화학적 영향에 의한 식물플랑크톤의 자체 발생과정이 더 크게 작용하는 것으로 사료되어 이에 관한 더욱 세밀한 평가가 이루어 질 필요가 있겠다. 진해만 중앙해역에서는 대부분 집적과 발산의 평형이 이루어지는 것으로 평가되었다.

3.4 외부환경요인의 변동에 따른 평가

식물플랑크톤 현존량과 물리적 과정량에 관계하는 많은 요인 중에서 본 연구에서는 유동장의 변동과 식물플랑크톤 광-광합성 응답에 관련이 있는 외부 환경요인인 바람과 일사량 및 일조시간을 각각 고려하여 그 영향을 평가하였고, 또한, 무기 영양염류와 유기탄소 등의 주 공급원인 육상오염부하의 변동에 의한 영향도 함께 평가해 보았다.

3.4.1 바람변동의 영향

연구지역에서 하계인 8월의 탁월풍향과 풍속을 고려했을 때 물리적 과정과 Chl-*a*의 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 동남동풍 1.6 m/sec를 입력했을 때는 A와 같이 Chl-*a*는 6~36 mg/m³ 범위로 마산만, 행암만 및 진동만에서 20 mg/m³ 이상의 고농도를 나타내었고, 진해만 남서부해역에서는 5~15 mg/m³ 정도로 상대적으로 낮은 농도를 보였다. 물리과정량의 분포는 무풍시와 집적하는 공간이 유사하였고, 대부분 공간에서 물리적인 평형상태가 지배하는 것으로 나타났다. 풍속을 5 m/sec로 증가했을 때는 B와 같이 Chl-*a*는 6~20 mg/m³ 범위로 여전히 고농도를 나타내었지만, A에 비해 상당히 감소하였다. 물리과정량의 분포는 집적하는 공간이 진동만과 마산만 등 북쪽지역으로 크게 확장하는 양상을 보여주었다. 그리고 서북서풍 1.4 m/sec를 고려했을 때는 C와 같이 Chl-*a*는 6~36 mg/m³ 범위로 A와 유사한 패턴을 보였지만, 물리과정량의 분포는 집적할 수 있는 공간이 칠천도 서쪽부근에 더 확장하는 것으로 예측되었다. 만약 풍속을 5 m/sec를 고려했을 때는 D와 같이 Chl-*a*는 4~18 mg/m³ 범위로 상당히 낮아졌으며, 물리과정량의 집적할 수 있는 공간은 중앙부를 제외하고 전역으로 크게 확장하는 것으로 예측되었다.

3.4.2 일사량 및 일조시간 변동의 영향

하계의 평균 일사량(약 587 g·cal/cm²/day)과 일조시간(0.5 day)이 각각 70% 감소된 경우는 Fig. 11의 A와 같이 Chl-*a*는 전역에서 5 mg/m³ 이하로 급격히 감소하여 적조발생은 일어나기 힘들고 발생된 적조는 소멸되는 것으로 시뮬레이션되었고, 물리과정량의 집적할 수 있는 공간은 서부해역 가조도 서쪽부근으로 국한되는 것으로 나타났다. 이에 반해서 일사량과 일조시간이 각각 70% 증가된 경우에는 B와 같이 Chl-*a*는 10~60 mg/m³ 범위로 급격히 증가하여 전역에서 적조발생 가능농도를 초과하였으며, 집적할 수 있는 공간도 가조도 서쪽과 가덕수로 북단에서 분포하는 것으로 평가되었다. 따라서, 일사량 및 일조시간의 변동 즉, 기상조건의 영향이 적조발생에 매우 큰 영향을 미칠 수 있는 요인으로 시뮬레이션되었다.

3.4.3 육상 오염부하량 변동의 영향

國立水産振興院[1995]에 제시된 대상해역으로 유입되는 육상오염부하량으로부터 유기물(화학적산소요구량, 입자성유기탄소와 용존성유기탄소)과 무기물질 부하량(용존무기인과 질소)을 일률적으로 70% 감소시킨 경우는 Fig. 12의 A와 같이 Chl-*a*는 4~32 mg/m³ 범위로 현 상태에 비해 다소 낮아졌지만 남서부 일부 공간을 제외하고는 여전히 10 mg/m³ 이상의 고농도를 유지하였으며, 물리과정량의 집적할 수 있는 공간은 거의 변동이 없는 것으로 나타났다. 반대로 70% 증가된 경우는 B와 같이 Chl-*a*는 4~42 mg/m³

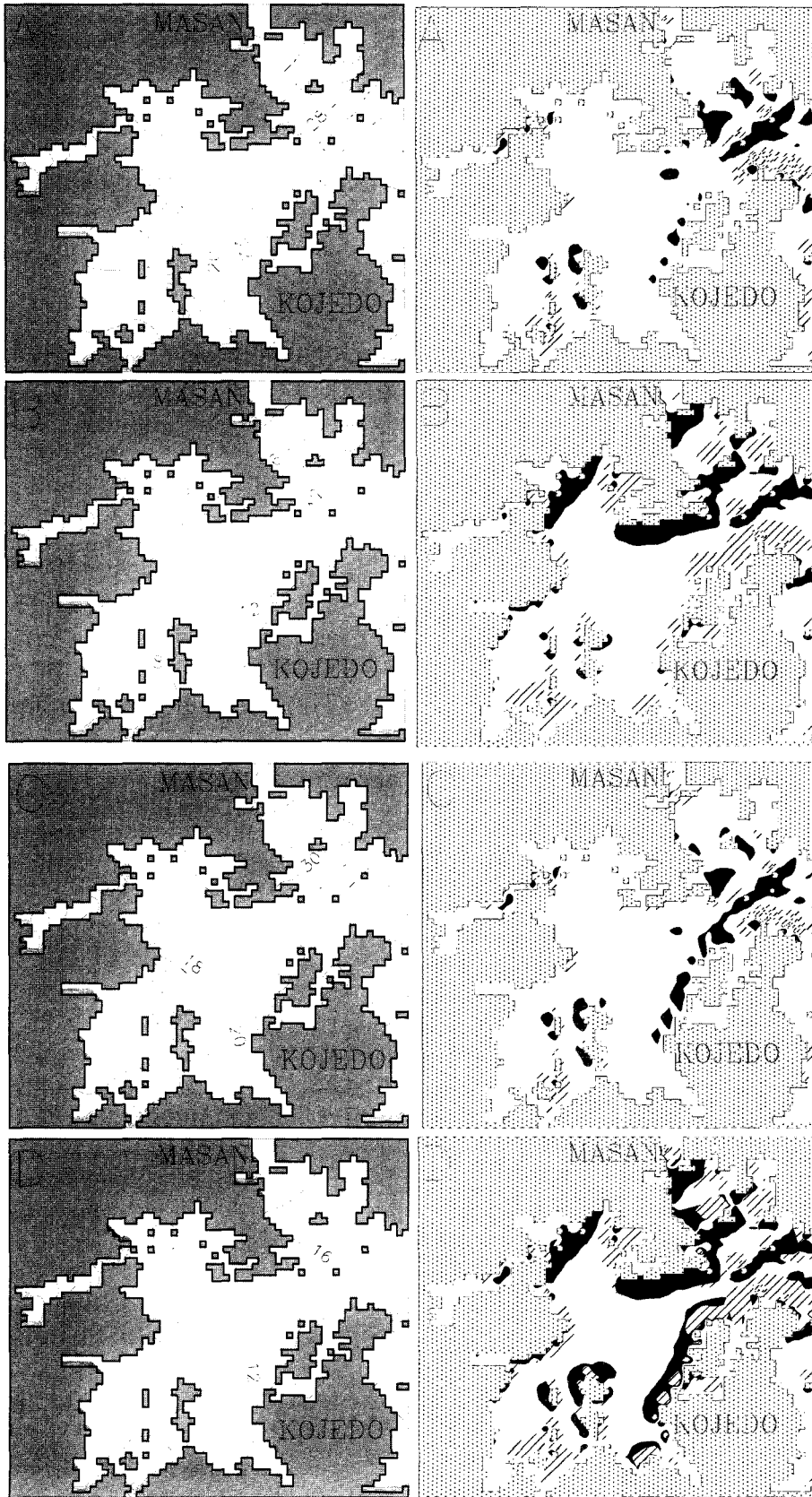


Fig. 10. The distribution of predicted Chl-a(mg/m³)(Left) and contributed physical process(Right) to Chl-a at surface level: filled area, accumulation; slanted area, transportation; blanked area, balance accumulation with transportation(A: ESE of 1.6 m/sec, B: ESE of 5.0 m/sec, C: WNW of 1.4 m/sec, D: WNW of 5.0 m/sec).

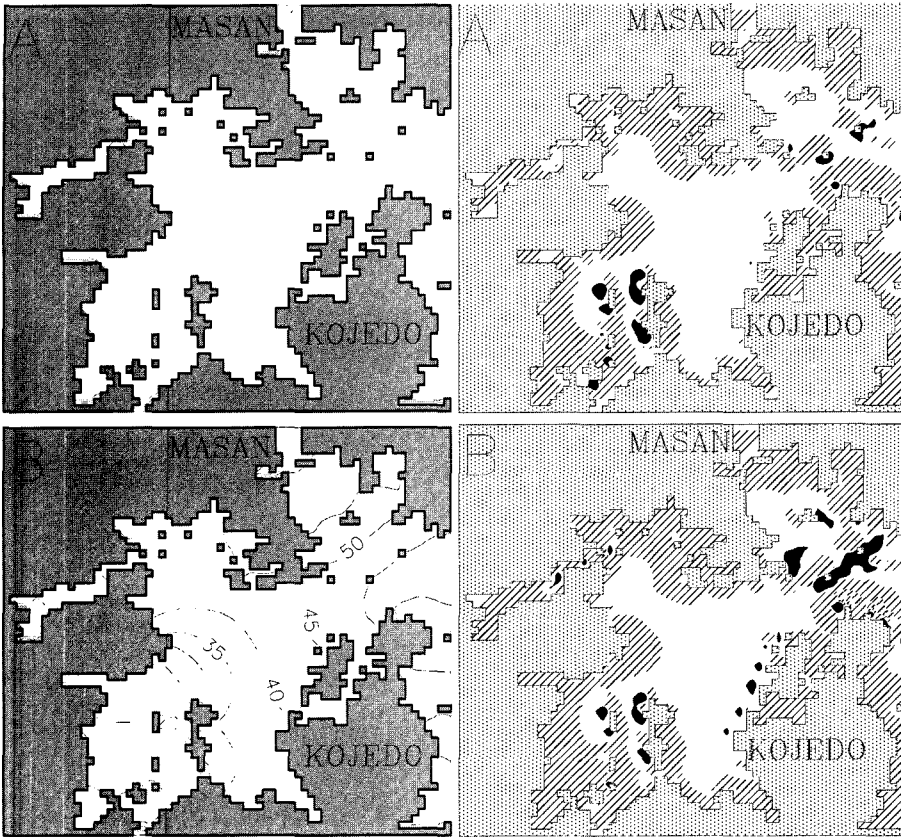


Fig. 11. The distribution of predicted Chl-a(mg/m^3)(Left) and contributed physical process(Right) to Chl-a at surface level: filled area, accumulation; slanted area, transportation; blanked area, balance accumulation with transportation(A: Decrease of the intensity of radiation and sunshine duration, B: Increase of the intensity of radiation and sunshine duration).

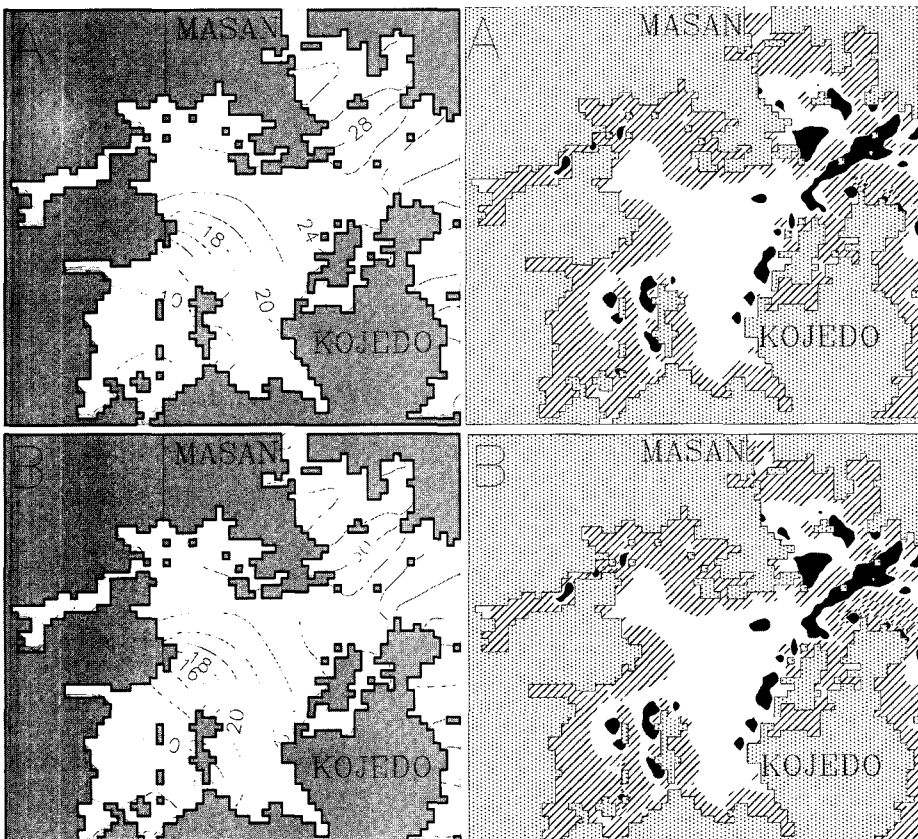


Fig. 12. The distribution of predicted Chl-a(mg/m^3)(Left) and contributed physical process(Right) to Chl-a at surface level: filled area, accumulation; slanted area, transportation; blanked area, balance accumulation with transportation(A: Decrease of riverine pollutant loads, B: Increase of riverine pollutant loads).

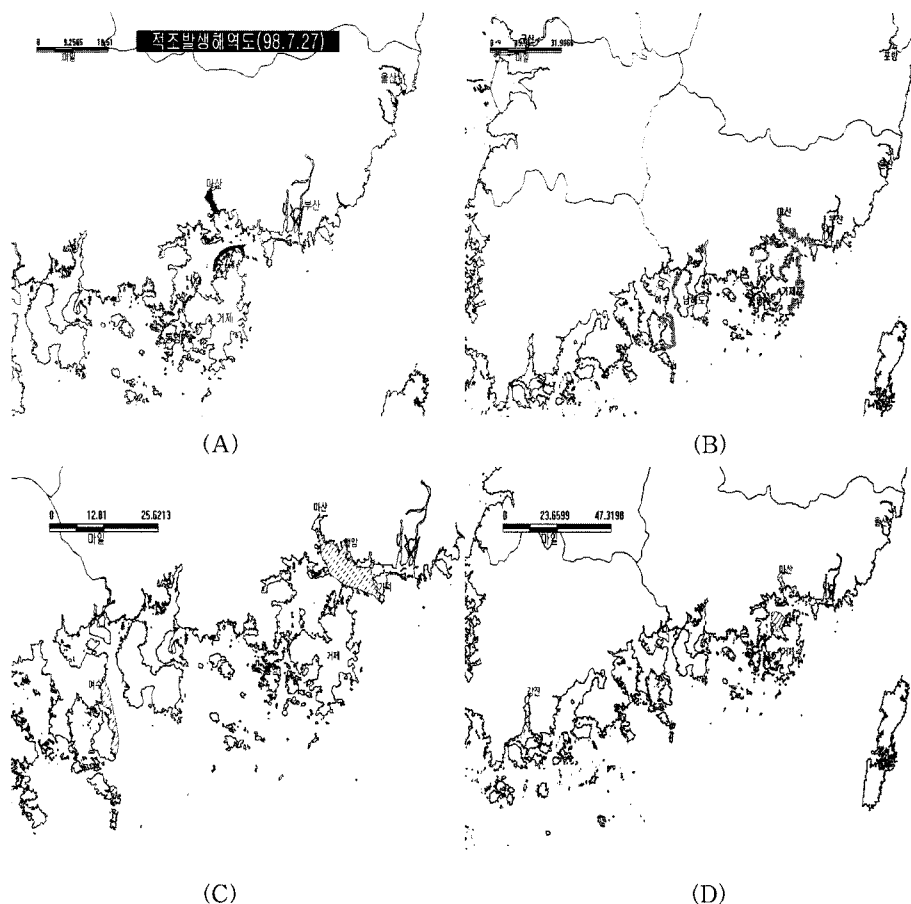


Fig. 13. The outbreak distribution of red tide by NFRDI(A: 27 Jul, 1998, B: 7 Jul, 1999, C: 18 Jul, 2000, D: 12 Aug, 2000).

범위로 현 상태보다 다소 증가했으며, 물리과정량은 큰 변동은 없는 것으로 예측되었다. 따라서 육상 오염부하량만의 변동으로는 식물플랑크톤의 분포를 적조발생 가능농도이하로 감소시키지는 않는 것으로 모델링되었다. 이것은 이 지역의 절대적인 오염부하량 자체가 크며, 또한 오염된 퇴적물에서의 용출부하량이 상당히 크기 때문이라 사료된다. 즉, 육상오염부하 뿐만 아니라 만 자체에서의 오염부하를 동시에 삭감해야만 오염물질 부하측면에서의 적조발생환경을 억제시킬 수 있는 것으로 사료되었다.

3.5 종합적 고찰

이상의 연구결과로부터 진해만의 하계 Chl-a 분포상황으로 평가되는 적조(Chl-a 10 mg/m³ 이상)는 다소의 불확실성이 내재되어 있지만, 거의 모든 공간에서 발생될 가능성을 가지고 있다고 하겠다. 다른 해역에 비해서 다양한 오염부하량에 의해 유기물과 무기물이 고농도로 축적되어 기저(Background)농도가 높은 상태에서 물리적 그리고 기상적 환경조건 특히, 일사량 및 일조시간이 뒷받침되면 언제든지 적조가 발생할 수 있다는 것이다. 특히, 동부해역쪽인 마산만, 행암만은 진해만내에서도 하계 평균 20mg/m³ 이상으로 가장 높은 Chl-a 농도를 보여 적조의 초기발생역으로 가장 확률이 높은 지역이고, 중서부해역에서는 진동만과 고현만으로 추정할 수 있을 것이다. 이러한 지역은 Chl-a에 대한 물리과정량을 계산한 결과 대부분 (-)향으로 나타나서 물리과정량 보다는 생물학적 과정 그 자체가 큰 기여를 하는 것으로 판단되고, 칠천

도와 가덕수로 복단에서 나타나는 적조는 물리적인 집적과정이 더 크게 작용하는 것으로 사료된다. 이러한 상황은 유동 및 풍향에 따라 남북으로 이동하는 것으로 나타나서 적조의 확산메카니즘과 밀접한 관련이 있을 것이다. 풍속의 증가는 식물플랑크톤이 어떤 장소에서 충분히 체류하며 성장할 시간을 감소시켜 Chl-a의 농도를 감소시키지만, 물리적으로 집적하는 공간의 확대를 야기시키는 것으로 예측되었고, 동남풍 계열보다는 북서풍 계열이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타나서 물질분포에 바람이 중요한 환경요인이라 사료된다.

국립수산과학원의 적조발생상황정보에 의해 실제 최근 본 해역에서 하계에 나타나는 대표적 적조의 발생역을 Fig. 13에 나타내었다. 본 해역에서의 최근 적조의 경향은 4-6월에 조기발생되는데, 초기발생역은 거의 대부분 마산만과 행암만으로 나타났고, 일사량과 일조시간이 가장 큰 7월과 8월에는 모델링 결과와 유사하게 초기발생역인 마산만 및 행암만은 지속적으로 적조가 유지되고 가덕수로 복단, 칠천도 부근, 진동만, 고현만 및 원문만 지역에서도 빈발하는 양상을 보여주어서 본 연구지역의 적조발생은 시·공간적으로 다소 차이가 있으며 또한 물리적인 집적과정과 일사량이 큰 영향을 미치고 있는 것으로 평가되었다. 이와 같이 본 연구에서는 진해만 해역에서의 하계 환경변동에 따른 적조발생 가능성과 초기발생역 평가 및 각 해역에서 식물플랑크톤 현존량에 대한 물리과정량을 평가해서 현재의 적조발생 실태와 연계해서 해석해 보았다. 물론, 세밀한 유동정보와 생태계모델의 구성요소중

식물플랑크톤을 한 종의 우점종으로 고려한 것과 현존량에 대한 생물학적인 과정량의 도출 및 평가는 좀 더 보완해서 연구할 필요성이 있다 하겠다. 적용하는 생태-유체역학모델의 제약과 한계점에 따라서 다소의 시·공간적 오차도 있겠지만, 차후 정밀하고 신뢰성있는 적조원인 규명 및 평가와 예측을 위해서는 발생원인 중별로 독립적인 생리·생태정보를 효율적으로 수식화해야 하고 그리고 그에 관계된 물리적·생지화학적 파라메타 및 실시간 해양데이터의 구축이 필요 할 것이고. 그리고 기존의 중점적인 영양염 요구성의 고려외에 바람, 강우량과 일사량 등 기상학적인 환경요인의 세밀한 처리가 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

진해만 해역에 있어서 적조가 발생했을 때 생태-유체역학모델링에 의한 하계 Chl-a 분포와 물리과정의 기여도를 평가해서 적조발생역과 환경을 고찰한 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 표층 잔차류 시뮬레이션 결과, 무풍시와 풍속 2 m/sec 이하 일 때 진해만 중서부해역과 동부해역에서 남향과 북향 하는 흐름이 상접하는 공간이 예측되었고, 풍속이 강해질 때는 유속도 강해지고 유향도 크게 달라지는 것으로 예측되었다.

(2) 생태계모델은 Chl-a에 대해 약 30%정도의 상대오차로 진동만과 가덕수로 인근 해역에서는 20 mg/m³ 이상으로 매우 높았고, 서부해역에서도 대부분 10 mg/m³ 이상으로 진해만은 전역에서 하계에는 적조발생 가능성이 매우 높은 것으로 예측되었다.

(3) 현 환경조건하에서 Chl-a 현존량에 대한 물리과정량을 평가한 결과, 동부해역의 가덕수로 복단과 칠천도, 서부해역의 진동만 내측 일부 그리고 가조도 서쪽지역에서 물리과정량이 (+)로 계산되어 물질의 집적이 일어날 가능성이 큰 공간으로 평가되었고, 마산만, 행암만, 진동만, 원문만 및 고힌만 등에서는 물리과정량이 (-) 즉, 발산지역으로 나타나서 물리과정량 보다는 생물학적인 과정이 큰 기여를 하는 것으로 고려되었다.

(4) 모델링과 현장관측자료 분석결과, 진해만 해역에 있어서 적조의 초기발생역은 마산만과 행암만으로 나타났고, 7월과 8월에는 마산만 및 행암만외에 가덕수로 복단, 칠천도 부근, 진동만, 고힌만 및 원문만 지역 등으로 확대되는 양상을 보여주었다.

(5) 풍속의 증가는 Chl-a의 농도를 감소시키고 물리적으로 집적하는 공간의 확대를 야기시키는 것으로 예측되었고, 동남풍 계열 보다는 북서풍 계열이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(6) 하계 평균 일사량 및 일조시간의 변동은 물리적 집적공간의 분포에는 큰 영향이 없었지만, Chl-a 급격한 증감을 초래하는 것으로 시뮬레이션되었다.

(7) 육상으로부터 오염부하량의 변동은 다소의 식물플랑크톤의 분포에 영향을 미치지만, 적조발생 가능농도이하로 감소시키는 않는 것으로 모델링되었다.

참고문헌

[1] 권철휘·조규대, 2002, "한국 남해안에서 *Cochlodinium* 적조 확산모델", 한국수산학회지, 35(6), 568-577.

- [2] 기상청, 2000, 기상월보.
 [3] 기상청, 2001, 기상월보.
 [4] 김광수·박청길·조은일, 1996, "생태계모델을 이용한 황해의 환경용량산정", 한국물환경학회지, 12(4), 383-399.
 [5] 박주석, 1982, "진해만 적조의 특성과 환경변화", 국립수산진흥원 연구보고, 28, 55-88.
 [6] 이대인, 2000, 洛東江 河口海域의 식물플랑크톤 極大域 變動에 관한 數値시뮬레이션, 부경대학교 대학원 박사학위논문.
 [7] 이대인·김동명·김형철·이석모·박청길, 2000, "洛東江 河口海域의 식물플랑크톤 極大域 變動에 관한 數値시뮬레이션, II. 식물플랑크톤 극대역 변동의 수치시뮬레이션", 한국환경과학회지, 9(5), 375-384.
 [8] 이대인·박청길, 2002, "東江 河口海域의 冬季 수질모델링", 한국물환경학회지, 18(5), 449-460.
 [9] 이대인·박청길·조현서, 2001, "점원 오염부하 제어에 의한 광양만의 수질관리", 한국해양환경공학회지, 4(3), 28-39.
 [10] 이문옥·백상호, 1998, "판별함수에 의한 진해만 적조예측", 한국환경과학회지, 7(1), 8-19.
 [11] 國立水産振興院, 1995, 富營養化 및 赤潮現象 糾明에 關한 研究.
 [12] 國立水産振興院, 1997, 韓國沿岸의 赤潮.
 [13] 金種九, 1994, 鎭海灣 海域의 夏季 富營養化 모델링, 부경대학교 대학원 박사학위논문.
 [14] 柳哲雄·山本隆司·小泉喜嗣·池田武彦·神蘭眞人·田森裕茂, 1993, "周防灘·伊予灘의 ギムノデイニウム 赤潮의 數値시뮬레이션", 水産海洋研究, 57(4), 319-331.
 [15] 水産廳·國立水産振興院, 1988, 沿岸漁場基本調査報告書 全國總括編, 99-133.
 [16] 岸道郎·池田三郎·平野敏行·西村陽, 1985, "赤潮生態系の 數値モデル", 沿岸海洋研究ノート, 22(2), 109-118.
 [17] 日本水産資源保護協會, 1972, 水産環境水質基準, 1-24.
 [18] 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.
 [19] Beca, R. G. and Arnett, R. C., 1976, A limnological model for eutrophic lakes and impoundments. Battelee, Inc., Pacific north-west laboratories, Richland, Washington.
 [20] Eppley, R. W., Renger, E. H., Venrick, E. L. and Mullin, M. M., 1973, "A study of phytoplankton dynamics and nutrient cycling in the central gyre of the North Pacific Ocean", Limnol. Oceanogr., 18(4), 534-551.
 [21] Nakata, K., Ishikawa, K. and Matukawa, Y., 1985, "Numerical models of coastal current and transport in the bay", Bulletin on Coastal Oceanography, 22, 96-108 (In Japanese).
 [22] USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1985, Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, 2nd edn, EPA 600/3-85/040, USEPA, Athens, GA.
 [23] Jorgensen, S. E., 1979, Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters. International Society for Ecological Modeling.

2003년 7월 22일 원고접수

2004년 1월 12일 수정본 채택