

부영양화해역의 내부생산효율에 대한 계절변동예측

이인철

부경대학교 환경·해양대학 해양공학과

Prediction of Seasonal Variations on Primary Production Efficiency in a Eutrophicated Bay

IN-CHEOL LEE

Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

KEY WORDS: Primary production efficiency 내부생산효율, Ecosystem model 생태계모델, Solar radiation intensity 일사량, Dissolved organic carbon (DOC) 용존태유기탄소, Seasonal variation 계절변동, Hakata bay 博多灣

ABSTRACT: The primary production of phytoplanktons produces organic matter in high concentration in eutrophicated Hakata Bay, Japan, even during the winter season in spite of low water temperature. Phytoplanktons are considered to have any biological capabilities to keep activities of photosynthesis under the unfavorable conditions, and this affects water quality of the bay. In this study, seasonal variations in primary production efficiency were predicted by using a simple box-type ecosystem model, which introduced the concept of efficiency for absorption of solar radiation energy in relation to growth of phytoplanktons under the low solar radiation intensity. According to the simulation result of primary production, it was indicated that the efficiency of primary production in winter is higher than that in summer. It was suggested that the organic pollution comes from dissolved organic carbon (DOC) throughout the year, DOC of which is originated from the primary production of phytoplanktons on biological response of the seasonal variation of ambient conditions.

1. 서 론

부영양화해역에서의 수질오염은 식물플랑크톤의 내부생산(기초생산)에 의한 유기오염이 주원인 것으로 알려져 있으며(中西와 浮田, 1975), 星加 등(1998)은 大阪灣에서의 유기오염의 80% 이상이 이러한 내부생산에서 유래된 것으로 보고하여 만내에서의 식물플랑크톤의 내부생산성이 수질에 미치는 영향은 매우 크다고 지적하고 있다. 이러한 내부생산에 의해 생성된 자생유기물은 해역의 부영양화를 진행시켜 만성적인 적조현상이나 빈산소수괴의 발생을 초래하게 된다. 이는 우리나라에서 1980년대 이후 남해안을 중심으로 주로 겨울철에 발생하던 적조현상이 최근에는 계절과 해역에 관계없이 전국 연안해역으로 확산되고 있는 상황과도 밀접한 관련이 있는 것으로 유추될 수 있다. 일본 서부연안에 위치한 博多灣에서도 매년 수온이 낮은 겨울철임에도 불구하고 부영양화와 적조현상이 발생하고 있어 수질뿐만 아니라 수산생태계 환경의 관리대책이 시급히 요구되고 있다.

내만역의 수질관리에 관한 연구들은 부영양화 및 적조현상의 규명(박, 1975; 해양연구소, 1983; etc), 식물플랑크톤의 내부생산의 평가(Nakanishi et al., 1991; 内田 등, 1994)와 물질수지 및 영양염의 동태해석(김, 1994; Yanagi, 1999; 이와 류, 2001) 등의 연구들이 수행되어져 오고 있으며, 최근에는 수치예측수법의

정도향상과 더불어 다양한 수치생태계모델들이 개발되어(中田 등, 1998), 오염물질의 유입에서부터 식물플랑크톤의 내부생산, 유기물의 분해 및 침강 등의 물질순환과정은 물론 환경변화에 따른 수산생물량의 변동을 예측하는 수법으로까지 발전되기에 이르렀다. 최근의 수치생태계모델의 예를들어보면 식물플랑크톤세포내의 인축적을 고려한 수질예측모델(平山와 和氣, 1998)이나, 식물플랑크톤의 구조류, 와편모조류의 종조성의 경쟁을 고려한 적조발생예측모델(山下와 福神, 1999) 등이 개발되어 플랑크톤개체군의 변동에 대한 수치예측이 시도되고 있으며, 플랑크톤의 저차생산에서부터 고차생산인 수산생물(어류, 저서생물 등)의 포식과정을 정식화하여 환경변화에 따른 수산자원량의 변화를 예측한 예도 있다(李와 關根, 2001). 그러나, 이들 수치생태계모델의 대부분은 식물플랑크톤의 생태적인 특성에 대해서 상세하게 기술하고 있지 않음에 따라 연간을 통한 내부생산의 효율성을 예측할 수 없어 겨울철의 유기오염의 재현 및 예측에는 다소 문제점들이 남아 있다.

따라서, 본 연구에서는 부영양화된 내만의 수질예측모형의 정도향상을 위해 겨울철의 식물플랑크톤의 환경적응성을 중심으로한 식물플랑크톤의 簡易내부생산모델을 개발하여, 일본의 博多灣의 내부생산효율의 계절변동특성과 겨울철에 발생하는 유기오염의 발생과정에 대하여 수치실험을 통하여 검토하였다.

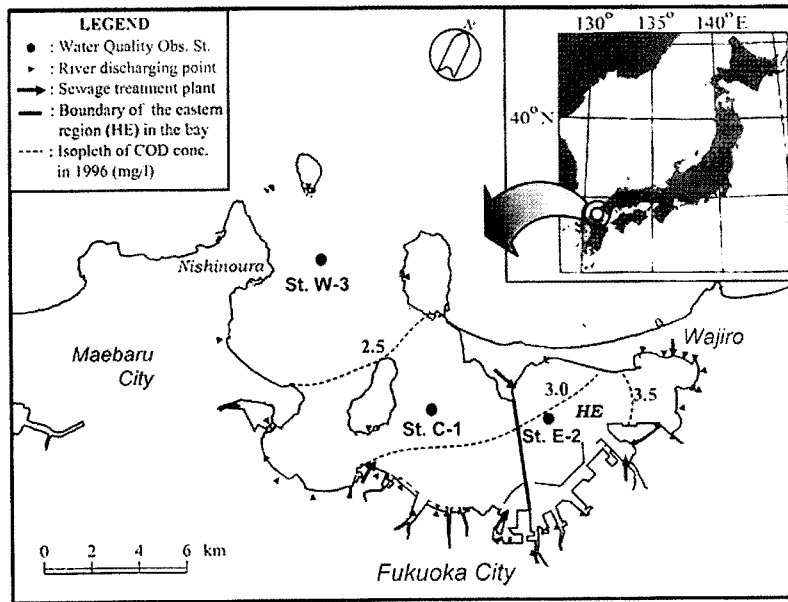


Fig. 1 Observation stations of water quality and river discharging points in Hakata bay. The HE region denotes calculation domain in this study

2. 博多灣의 수질환경

博多灣은 東西 약 20 km, 南北 약 10 km, 총면적 약 134km²의 동서로 좁고 긴 형상을 가진 반폐쇄성 내만이다(Fig. 1). 연구대상해역인 博多灣의 동부해역(HE)은 수심 5 m 이하의 천해역으로 만 안쪽의 수질은 연평균 COD농도가 약 3.5 mg/l를 넘는 부영양화 해역으로 되어 있어 적조현상과 빈산소수괴가 매년 발생하고 있을 뿐만 아니라 최근에는 겨울철의 수질오염 현상이 대두되고 있어 연간을 통한 적절한 수질관리 대책이 요구되고 있다.

본 절에서는 博多灣의 수질오염 현황을 파악하고자 만내에 유입하는 오염물질 부하량의 계절변동을 조사하고, 수질오염이 현저한 만 안쪽의 수질관측점 St. E-2에서 조사된 1996년 4월~1997년 3월까지의 월별수질관측결과를 기초로하여 수질의 계절변동특성에 대하여 고찰한다.

2.1 유입오염부하량

博多灣에 유입되는 오염부하량은 하천과 하수처리장으로부터의 유입부하로 구분되지만, 만 중앙부에서 만 안쪽에 이르는 연안에 위치하는 하수처리장으로부터 유입되는 오염부하가 만 전체의 오염부하량의 약 2/3를 점유하여 주요한 오염부하원으로 되고 있다.

육역으로부터 유입되는 담수량과 형태별 오염부하량의 계절별 평균치를 Table 1에 나타내었다. 담수유입량의 연평균치는 약 2.5×10^6 m³/day로, 장마시기인 6월~9월의 여름철에 많았다. 오염부하량의 연평균치는 무기태질소(IN)가 약 12.2 ton/day로 가장 많았으며 다음으로 용존태 화학적산소요구량(DCOD)이

Table 1 Inflow of freshwater discharge and pollutant loads into Hakata bay

Season	Freshwater ($\times 10^6$ m ³ /day)	Pollutant loads (ton/day)					
		DCOD	PCOD	IN	ON	IP	OP
Mean	2.5	11.7	3.3	12.2	1.4	0.5	0.3
Spring	2.9	13.1	4.3	11.8	2.0	0.5	0.3
Summer	3.7	15.5	5.0	13.4	1.5	0.7	0.4
Autumn	1.7	9.0	2.1	11.2	1.1	0.4	0.2
Winter	1.5	9.2	1.9	12.2	1.1	0.3	0.2

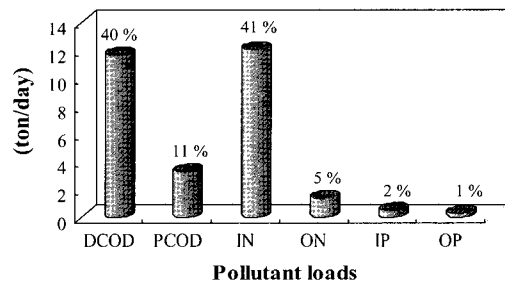


Fig. 2 The occupation percentage of each pollutant load in Hakata bay

약 11.7 ton/day, 무기태인(IP)은 약 0.5 ton/day정도였다. 영양염 부하량의 계절변동을 보면, IP는 수온이 높은 여름철에 가장 많고 겨울철에 적었으며, IN은 여름철과 겨울철의 부하량이 거의 같은 수준이었다. 이들 형태별 오염부하량의 비율은 DCOD와 IN이 각각 40%정도로써 총부하량의 80%를 차지하였으며, 다음으로 입자태COD(PCOD)가 11%, 유기태질소(ON)가 5%의 순이었으며 인은 약 3%정도에 불과하였다.

2.2 수질의 계절변동

博多灣 HE해역(St. E-2)에서 1996년 4월~1997년 3월까지 표층(0.5 m), 중층(2.5 m) 및 저층(해저면상 1 m)에서 채수하여 측정된 월1회의 수질관측자료(福岡市環境局, 1997)를 이용하여 수질의 계절변동 특성에 대하여 고찰하였다. 수질항목은 식물플랑크톤, 클로로필-a (Chl-a), 용존태와 입자태의 유기탄소 (DOC와 POC), 용존태유기질소와 인 (DON과 DOP), 암모니아 질소 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 질산 질소 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 인산인 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 등이다.

Fig. 3은 DOC와 POC농도, 식물플랑크톤의 세포수 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도의 계절변동을 나타낸 것이다. POC농도는 5월에 가장 높고 전체적으로 여름철에 다소 높은 경향이었으나, DOC농도는 계절적으로 뚜렷한 농도차를 보이지 않아 연간 일정한 농도를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 2월의 DOC농도는 수온이 낮은 겨울철임에도 불구하고 여름철과 같은 정도로 농도가 높게 나타나는 것이 특징이었다. 식물플랑크톤의 계절변동은 봄철에 와편모조류(*Dinoflagellates*)가 우점종인 것을 제외하면 연간에 걸쳐 거의 규조류(*Diatoms*)가 우점종이었다. 규조류는 하천으로부터의 규소(Si)의 공급이 많은 7월과 9월의 강우기에 가장 많이 분포한 후 1월부터 재차 세포수가 증가하는 양상을 보여 DOC농도가 겨울철에 높아지는 경향과 유사하였다. 이러한 식물플랑크톤의 발생추이를 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)농도와 관련해서 보면 5월~9월까지의 수온과 일사량이 높아 식물플랑크톤의 증식활동이 활발하여 영양공급원인 질소농도가 거의 고갈될 정도로 흡수되고 있으나, 수온과 일사량이 낮은 1월~3월까지의 겨울철에는 규조류에 의한 내부생산활동이 있음에도 불구하고 수중의 질소농도는 여름철에 비하여 높은 농도를 유지하고 있었으며, 겨울철의 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 거의 일정하게 변화하였다. 이는 식물플랑크톤에 의한 질소흡수과정에 있어서 겨울철에는 수온저하에 따라 질산화과정이 억제됨으로 인하여 많이 존재하는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 우선적으로 이용되고 있는 것으로 유추할 수 있으며, 이와 같이 수온 및 일사량조건이 결코 적합하지 않은 겨울철에 규조류 플랑크톤의 증식이 활발할 수 있는 것은 여름철과 비교하여 효율적으로 광합성반응이 일어나고 있는 것으로 추측되어 진다.

3. 簡易내부생산모델의 내용

3.1 모델의 개요

(1) 빛에너지의 흡수효율

일반적으로 식물플랑크톤의 광합성반응은 수온, 영양염농도 및 빛에너지(일사량)에 의해 제한된다. 겨울철의 연안환경은 영양염은 풍부하게 존재하지만, 수온과 일사량이 낮아 식물플랑크톤의 내부생산과정에는 결코 적합한 조건이 되지 않는다. 그러나, Fig. 3(a)~(b)와 같이 博多灣에서는 식물플랑크톤의 증식과 더불어 겨울철의 총유기탄소(TOC)농도가 여름철과 거의 같은 정도로 해수중에 존재하고 있다. 이와같은 계절별의 내부생산성과 유기오염을 예측하기 위해서 다음과 같은 식물플랑크톤의 광합성반응과 질소흡수의 특성을 고려한 簡易내부생산모델을 작성하였다.

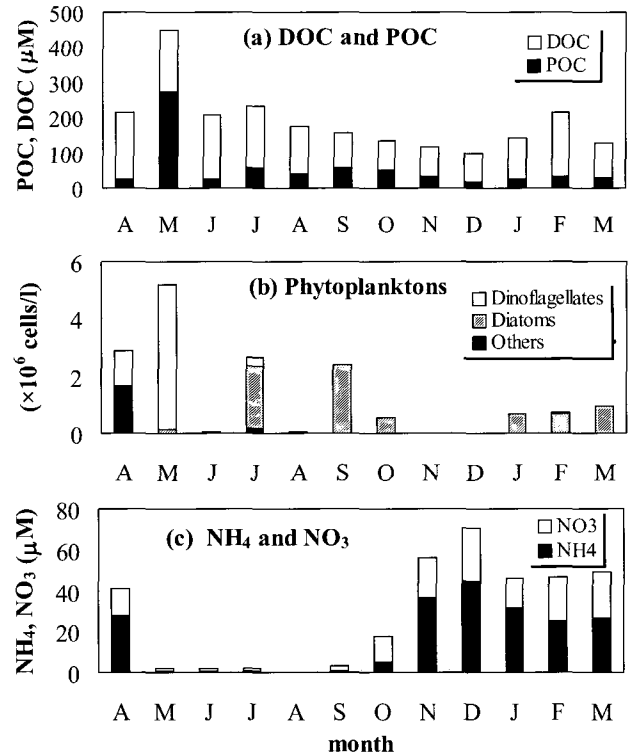


Fig. 3 Seasonal variations in (a) DOC and POC, (b) Phytoplankton, and (c) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ at the surface layer of St. E-2 in Hakata bay

(1) 빛에너지의 전환

식물플랑크톤의 광합성은 명반응과 암반응의 2개의 반응계에 의해 구성된다 (Fig.4). 명반응은 빛에너지의 생화학반응에 의한 ATP (Adenosine-Tri-Phosphate)나 NADPH (Nicotin-amide- Adenine-Dinucleotide-Phosphate)와 같은 에너지원물질을 생성하는 반응이며, 암반응은 ATP와 NADPH의 에너지 生成能을 이용한 CO_2 의 환원에 의한 유기물생산반응 (식물플랑크톤의 세포증식)이다. 그리고, 식물플랑크톤의 증식을 위해서 필요한 영양염의 흡수과정에서도 세포내 아미노산 결합생성을 위해 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 으로의 형태변환 등 CO_2 의 환원반응과 같이 ATP와 NADPH에 의한 에너지 전환이 필요하게 된다. 따라서, 겨울철과 같은 약한 빛에너지조건에서도 식물플랑크톤의 빛에너지 흡수효율이 크게 되면 내부생산물질도 많아질 것으로 예상할 수 있다. 즉, 여름철에는 세포내부에서 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 환원반응에 에너지가 전환되었던 빛에너지부분이 겨울철에는 풍부하게 존재하는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 내부생산과정에 우선적으로 이용될 수 있음에 따라 에너지 절약이 가능하여 약한 빛에너지조건하에서도 충분한 광합성반응이 일어날 수 있다. 따라서, 이와같은 반응과정을 빛에너지의 식물플랑크톤으로의 흡수효율로서 정식화하였다.

(2) 질소흡수의 형태변환

식물플랑크톤의 내부생산에 있어서 영양염으로서 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이나 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 를 섭취하지만, 질소의 이용시에는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 어떤 임계치 이상일 경우는 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 을 흡수하지 않는 것으로 알려져

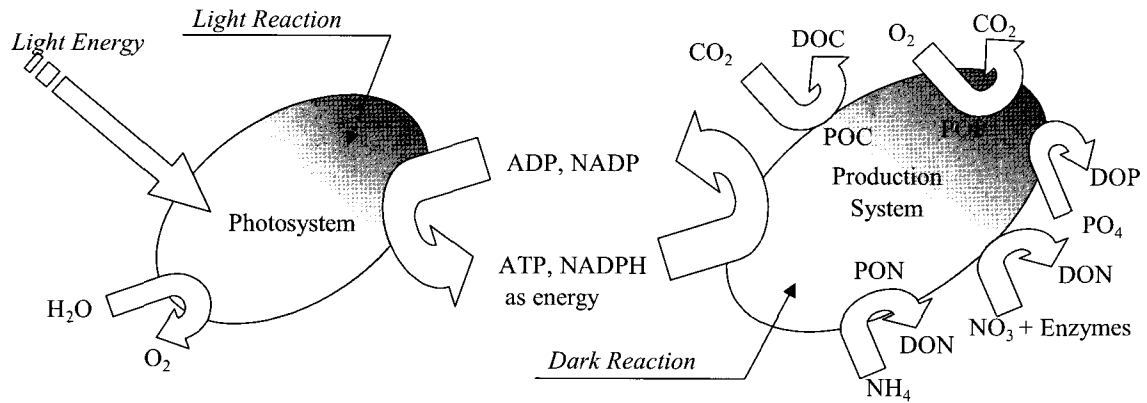


Fig. 4 Reaction system of photosynthesis by phytoplankton (Conn *et al.*, 1965)

Table 2 Definition of symbols and value of preset parameters in the model

Symbol	Definition	Preset parameter and coefficients	Symbol	Definition	Value	Unit
μ_e	Final growth rate of phytoplankton	$\mu(S) \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot \varepsilon$	μ_N^*	Growth rate at infinite Q_N	4.0	1/day
μ'	Respiration of phytoplankton	$\mu(S) \cdot f(T) \cdot 0.1$	μ_P^*	Growth rate at infinite Q_P	5.0	1/day
$\mu(S)$	Growth rate decided by interdependence among nutrients (Nitrogen, Phosphorus)	$\min(\mu_N, \mu_P)$	α_2, α_3	Constant for function of T	0.25, 0.1	-
μ_N	Growth rate decided by nitrogen (N)	$\mu_N^* \cdot (1 - q_0^N/Q_N)$	β_2, β_3	Constant for function of T	0.06, 0.04	-
μ_P	Growth rate decided by phosphorus (P)	$\mu_P^* \cdot (1 - q_0^P/Q_P)$	q_0^N	Minimum cell quota of N	0.0325	pmol/cell
Q_N	Dependence term on nitrogen	$q_0^N + Q'_{NH_4} + Q'_{NO_3}$	q_0^P	Minimum cell quota of P	0.0025	pmol/cell
Q_P	Dependence term on phosphorus	$q_0^P + Q'_{PO_4}$	$Vmax^{NH_4}$	Maximum intake rate of NH_4	2.5	pmol/cell/day
Q'_{NH_4}	Half saturation term of NH_4	$Vmax^{NH_4} S_{NH_4} / (K_{NH_4} + S_{NH_4})$	$Vmax^{NO_3}$	Maximum intake rate of NO_3	0.8	pmol/cell/day
Q'_{NO_3}	Half saturation term of NO_3	$FVmax^{NO_3} S_{NO_3} / (K_{NO_3} + S_{NO_3})$	$Vmax^{PO_4}$	Maximum intake rate of PO_4	1.0	pmol/cell/day
Q'_{PO_4}	Half saturation term of PO_4	$Vmax^{PO_4} S_{PO_4} / (K_{PO_4} + S_{PO_4})$	S_{NH_4}	Concentration of ambient NH_4	-	μM
$f(T)$	Dependence term on water temp.(T)	$\{(T/T_0 \cdot \exp(1 - T/T_0))\}^{1.5}$	S_{NO_3}	Concentration of ambient NO_3	-	μM
$f(I)$	Dependence term on light intensity	$\{(I/I_0 \cdot \exp(1 - I/I_0))\}^{1.5}$	S_{PO_4}	Concentration of ambient PO_4	-	μM
I	Light intensity at measurement depth	$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot Z)$	K_{NH_4}	Half saturation coeff. of NH_4	-	μM
T_0	Optimum water temperature (T)	30.0 °C	K_{NO_3}	Half saturation coeff. of NO_3	-	μM
I_0	Optimum light intensity (I)	456 ly	K_{PO_4}	Half saturation coeff. of PO_4	-	μM
I_S	Light intensity at surface of sea	ly	k	Light dissipation coefficient	1.7	1/m
			Z	Measurement depth	-	m

있다 (MaCarthy *et al.*, 1977). 이는 NH_4^+ -N쪽이 NO_3^- -N또는 아질산염보다도 흡수속도가 빨라서 세포내에서 NO_3^- -N의 환원에 필요한 질산환원효소의 합성에 대한 여분의 빛에너지를 절약할수 있기 때문인 것으로서 이와같은 NH_4^+ -N에 의한 NO_3^- -N의 흡수억제효과 (F)는 다음식으로 표현된다(Zevenboom & Mur, 1981).

$$F = \frac{1}{1 + S_{NH_4}/K_i} \quad (1)$$

여기서, S_{NH_4} 는 NH_4^+ -N농도, K_i 는 NH_4^+ -N의 흡수저해계수 (=3 μM)이다. 또한, NH_4^+ -N의 흡수에는 NO_3^- -N농도는 영향을 주지

않는다 (Nakamura, 1985).

3.2 모델의 정식화

(1) 빛에너지의 흡수효율

본 모델에서는 상술한 바와 같이 식물플랑크톤의 세포내에서 NH_4^+ -N에 의한 NO_3^- -N의 흡수억제효과(F)는 질산환원효소의 생 성과정을 필요로 하지 않는다고 가정하였다. 따라서, 빛에너지의 흡수효율 (ε)은 식(2)와 같이 F의 함수로서 표현된다.

$$\varepsilon = \alpha_1 \times \exp(1 - \beta_1 \cdot F) \quad (2)$$

여기서, α_1 과 β_1 은 효율계수로서 각각 0.42와 0.6으로 설정하였다.

(2) 식물플랑크톤의 내부생산

식물플랑크톤의 내부생산에 대해서는 증식인자인 수온, 영양염농도, 빛에너지(일사량)의 3요소에 식(2)의 ϵ 을 고려하여 정식화하였다 (Table 2). 한편, 식물플랑크톤 (P)의 현존량과 생성·변화항의 시간변화는 각각 식(3)과 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = B_1 - B_2 - B_3 + B_4 \quad (3)$$

$$B_1 = P \times (\mu_e - \mu') \quad (4)$$

$$B_2 = \alpha_2 \times B_1 \times \exp(\beta_2 \times T)$$

$$B_3 = \alpha_3 \times B_1 \times \exp(\beta_3 \times T)$$

여기서, B_1 은 P 의 증식항, B_2 는 동물플랑크톤의 포식항, B_3 는 P 의 소멸항, B_4 는 이류항으로서 이와 류 (2001)의 유동계산 결과로부터 구한 HE해역의 외경계 단면유량을 이용하였다. 모델의 수식에 관한 변수와 계수값은 Table 2에 나타내었다.

3.3 계산조건

본 모델은 博多灣의 HE해역을 대상으로한 Box-type모델이며, 계산시간은 1996년 4월 1일~1997년 3월 31일까지의 1년간으로 하였다. 수질예측항목은 식물플랑크톤의 현존량, Chl-a, 용존무기태영양염 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)과 용존유기태영양염 (DOC, DON, DOP)의 8개 항목이다. 계산에 필요한 기상조건은 기상정보 (日本氣象協會, 1996)에 의해 기온 및 일사량의 일평균치를 이용하였다. 모델의 계산시간간격은 0.25 day로 설정하였고, 계산결과를 St. E-2에서의 수질관측치와 비교하여 검증하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 내부생산량의 예측

Fig. 5는 식물플랑크톤의 현존량(내부생산량) 및 Chl-a농도의 계산치와 관측치의 계절변동을 나타낸 것이다. 식물플랑크톤(P)의 계산치는 봄철(4월~5월)에 높고, 6월과 8월에 낮게 나타나 연간에 걸쳐 관측치와 거의 일치하였으며, 겨울철(1월~3월)의 식물플랑크톤의 세포수는 여름철(7월과 9월)과 같은 정도로 약 2×10^6 cells/l를 나타내었다. 그리고, Chl-a농도의 계산치는 Chl-a/P비를 연간 일정하게 적용함에 따라 여름철(7월~9월)에는 관측치보다 다소 낮았으나, 11월의 농도감소나 겨울철의 농도증가 경향은 관측치와 유사하게 나타났다. 이 결과로부터 식물플랑크톤의 내부생산량은 여름철과 겨울철의 해역환경조건이 상이하지만 거의 같은 정도의 내부생산성이 있음을 알 수 있다.

4.2 내부생산인자의 예측

(1) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 의한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 흡수억제효과 (F)

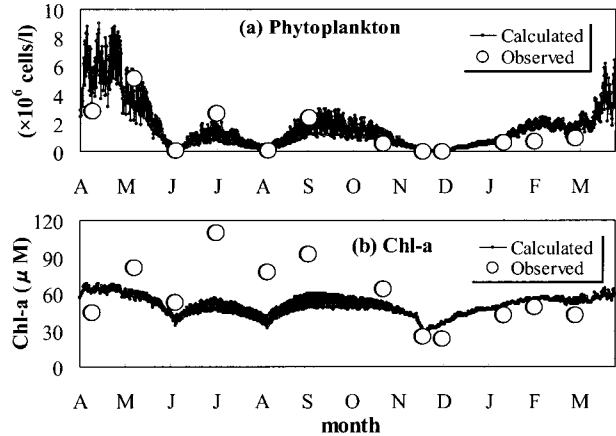


Fig. 5 Comparison between calculated and observed results, at St. E-2, (a) : Phytoplankton, (b): Chl-a

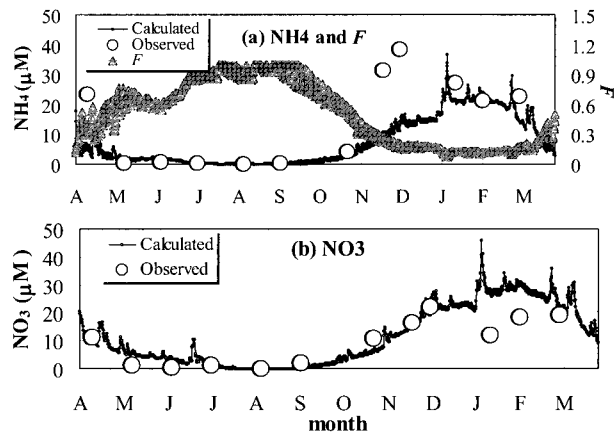


Fig. 6 Comparison between calculated and observed results, at St. E-2, (a) : $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and F , (b): $\text{NO}_3^-\text{-N}$

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도의 계산치와 관측치 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 의한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 흡수억제효과 (F)의 계산치를 Fig. 6에 나타내었다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도의 계산치와 관측치는 계절적으로 잘 일치하였으며 겨울철에는 양쪽 모두 농도가 증가하는 경향이 잘 재현되었다. 또한, F 값은 4월부터 서서히 증가한 후 여름철에 최대값을 나타낸 다음 다시 점차적으로 감소하여 겨울철에 최소로 되는 경향으로 예측되었다. 이것은 가을부터 수온이 점점 낮아짐에 따라 질산화작용의 감소에 의해 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도가 점차적으로 증가하는 변화로 예상된다. 특히, F 값은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 수온변화와 높은 상관관을 보였다.

(2) 빛에너지의 흡수효율 (ϵ)

식 (2)로부터 구한 식물플랑크톤의 광합성에 대한 빛에너지의 흡수효율 (ϵ)을 수온 ($f(T)$)과 일사량 ($f(I)$) 및 최대증식속도 (μ_e)의 계산결과와 비교하였다. ϵ 과 $f(T)$ 의 응답특성 (Fig. 8(a))을 보면, ϵ 은 수온이 높은 여름철에 작고 겨울철에 크게 되는 양

상으로 수온이 가장 낮은 2월경에 최대치를 나타내었다. 이와 더불어 식(4)중의 μ_e 의 변화 (Fig. 8(c))도 ϵ 을 고려하지 않은 경우 (μ_e/ϵ)와 비교하여 연간에 걸쳐 완만하게 변화함에 따라 Fig. 3(b)와 같이 겨울철에 식물플랑크톤의 내부생산성이 높을 수 있는 것으로 유추할 수 있다.

(3) 내부생산의 Potential (δ)

만내의 유기오염과 관계된 DOC농도의 계산치와 관측치를 비교하면 Fig. 9와 같다. DOC농도의 계산치는 3월의 관측치에는 미치지 못하였으나 대체적으로 관측치의 계절변동과 거의 유사하였다. 특히 12월 이후의 겨울철에 DOC농도의 증가와 2월의 최대농도치는 잘 재현되었으며, 이들 농도값은 연간에 걸쳐 약 100~200 μM 의 범위로 변동하여 수온변화에 관계없이 농도가 일정하게 유지되고 있음을 보여준다. 이는 DOC가 주로 식물플랑크톤의 내부생산과 더불어 분비되는 유기물 등으로서 겨울철에는 미생물에 의한 분해활동이 저하됨에 따라 장시간 잔존될 수 있기 때문인 것으로 예상된다. 이상의 결과로부터 겨울철에 DOC농도가 높게 나타나는 유기오염현상을 보다 상세히 검토하기 위하여 앞에서 설명한 계산결과를 토대로 내부생산 Potential (δ)을 식(5)와 같이 정의하여 식물플랑크톤의 내부생산성의 계절변동 특성에 대하여 고찰하였다.

$$\delta(\mu\text{M}) = (P_b) + (P_R) + (Z_G) + (P_M) + (P_{Ad}) \quad (5)$$

$$\Phi = S_{Chl-a} / \delta \quad (6)$$

여기서, P_b 는 식물플랑크톤의 내부생산량, P_R 은 식물플랑크톤의 호흡량으로서 세포외분비에 의한 유기물의 생산을 의미하며, Z_G 는 동물플랑크톤에 의한 포식량, P_M 은 식물플랑크톤의 소멸량(사망, 분해 등), P_{Ad} 는 식물플랑크톤의 이류량을 나타낸다. 또한, Φ 와 S_{Chl-a} 는 각각 내부생산효율과 Chl-a농도의 계산치를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 식(5)와 (6)으로부터 구하여진 δ 와 Φ 의 계절변동을 나타낸다. Φ 의 계절변동은 전반적으로 겨울철이 다소 높은 경향을 나타내었으며, 여름철의 단기간에 보인 최대치는 Fig. 6(a)의 F 값의 급격한 감소에 따른 영향으로 예상된다. 그리고, δ 의 계절변화는 연간에 걸쳐 두드러진 변화는 보이지 않았으나 수온이 증가함에 따라 높아지는 형태로 나타났다. 이와같이 博多灣의 HE해역에서는 수온과 일사량이 높은 여름철에는 δ 는 높지만 Φ 는 상대적으로 낮으며, 수온이 낮은 겨울철에는 Φ 는 높으나 δ 는 낮은 것으로 예측되었다. 따라서, 해당해역에서의 겨울철의 유기오염현상은 식물플랑크톤의 환경적응성에 의해 내부생산효율(Φ)이 높아짐에 따라 증식활동이 가능할 수 있는 현상과 이와더불어 낮은 수온에서 미생물에 의한 유기물의 분해활동이 저하되어 식물플랑크톤으로부터 분비되는 용존유기물농도(예, DOC)의 분해가 억제되는 현상이 중첩되어 나타나는 것으로 예상되어 진다.

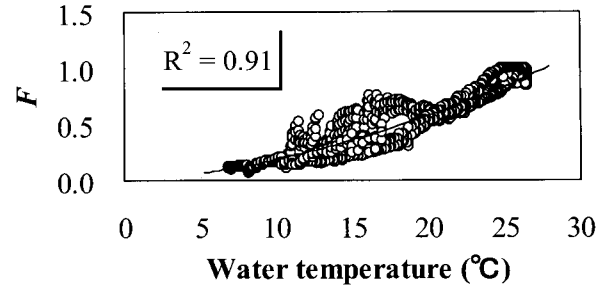


Fig. 7 Relationship between F values and water temperature ($^{\circ}\text{C}$)

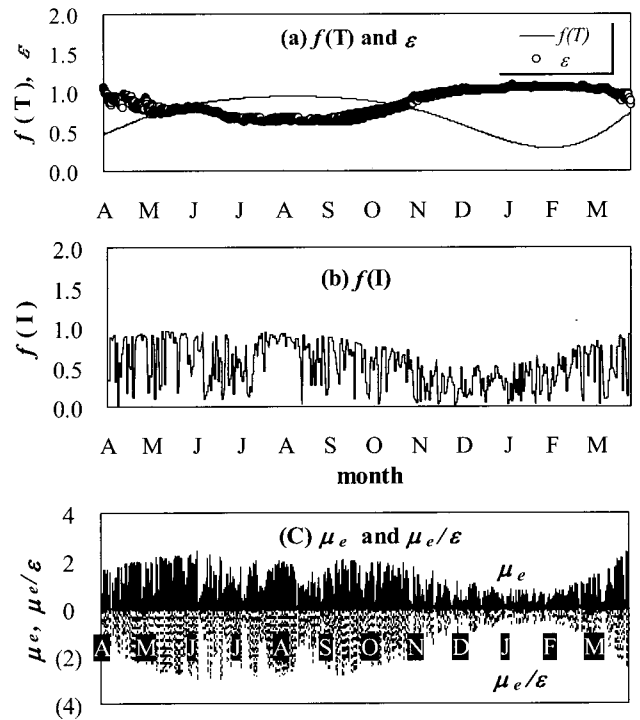


Fig. 8 Calculated results of seasonal variations in (a) $f(T)$ and ϵ , (b) $f(I)$, and (c) μ_e and μ_e/ϵ

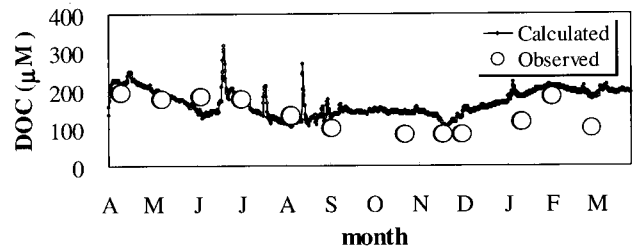


Fig. 9 Comparison of calculated DOC concentration with observed one at St. E-2

5. 요약 및 결론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 식물플랑크톤의 광합성반응과 관련한 빛에너지 전환성과 질소흡수의 형태변환특성 등을 고려한 簡易내부생산모델을 작성하였다. 빛에너지의 흡수효율은 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 의한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 흡수억제효과 (F)와 수온함수로 나타내었다.
- (2) 簡易내부생산모델을 이용한 博多灣 HE해역의 수질예측결과로부터 수질의 계산치와 관측치는 유사한 계절변동을 나타내었으며, 겨울철의 식물플랑크톤의 내부생산량은 여름철과 거의 같은 정도로 예측되었다.
- (3) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 의한 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 흡수억제효과 (F)는 수온과 상관성이 높았으며, 빛에너지의 흡수효율 (ϵ)에 의해 겨울철의 식물플랑크톤의 내부생산성이 높아질수 있는 것 나타났다.
- (4) 博多灣에서 겨울철의 유기오염현상은 식물플랑크톤의 내부생산효율이 높아짐에 따라 증식활동이 가능할 수 있는 현상과 미생물에 의한 유기물의 분해활동이 저하되어 DOC의 분해가 억제되는 현상이 중첩되어 나타나는 것으로 예상되었다.

참고 문헌

김종구(1994). "진해만 해역의 하계 부영양화 모델링", 부산수산대학교 박사학위논문. p 138.

朴淸吉(1975). "鎭海灣 海水의 富營養化와 Chlorhyll分布", 한국수산학회지, 第8卷 第3號, pp 121~126.

이인철, 류청로(2001). "水-底質생태계모델에 의한 博多灣의 물질순환예측", 한국해양환경공학회지, 第4卷 第2號, pp 3~14.

李寅鐵, 關根雅彦(2001). "연안어장의 환경변화가 수산자원량에 미치는 영향평가", 한국해양공학회지, 제15권 제1호, pp 36~44.

해양연구소(1983). "赤潮 및 汚染 모니터링 研究", BSPE0048-80-7. p 326.

Conn, E.E., Stumpf, P.K., Bruening, G. and Doi, R.H.(1965). "Tokyo Kagaku Dohjin", *Outline of Biochemistry*, p 422.

Nakamura, Y.(1985). "Ammouinm uptake kinetics and interactions between nitrate and ammouinm uptake in *Chattonella aniqua*", *J. of Oceanogr.*, Vol. 39, pp 167~170.

Nakanishi, H., M. Ukita and M. Sekine(1991). "Evaluation of primary production loads and their control in enclosed seas", *Marine pollution Bulle.*, Vol. 23, pp 25~29.

McCarthy, J.J., W.R. Taylor and L. Taft(1977). "Nitrogenous nutrient of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences", *Limnol. Oceanogr.*,

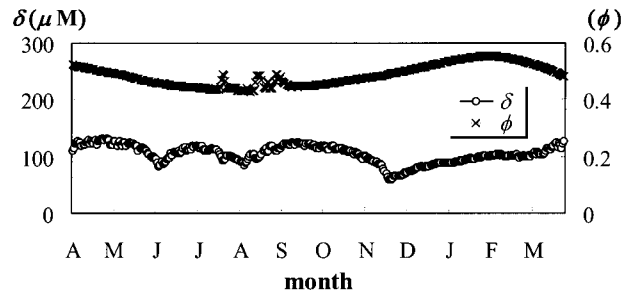


Fig. 10 Simulated results of seasonal variations in values of δ and ϕ

Vol. 22, pp 996~1011.

Yanagi,T(1999). "Seasonal variations in nutrient budgets of Hakata Bay, Japan", *J. of Oceanogr.*, Vol. 55, pp 439~448.

Zevenboom, W., and Mur, L.R.,(1981). "Simultaneous short-term uptake of nitrate and ammonium by osillatoria agardhii in nitrate-or light-limited continuous culture", *J. of Gen. Microbiol.*, Vol. 126, pp 355~363.

平山彰彦, 和氣亞紀夫(1998). "リンのSSからの脱着とプランクトン細胞内蓄積を考慮した水質モデル", 日本土木學海岸工學論文集, 第45卷, pp 1041~1045.

星加 章, 谷本照巳, 三島康史(1999). "大阪灣における富營養化と内部生産有機物", 水環境學會誌, 第21卷 第11號, pp 765~771.

福岡市環境局(1997). "福岡市水質測定結果報告", 1996年 4月 ~ 1997年 3月, pp 14~151.

中西 弘, 浮田正夫(1975). "海域におけるCOD生産について", 用水と廢水, 第17卷 第6號, pp 725~735.

中田喜三郎, 中田英昭, 田口浩一, 田中昌宏, 鈴木輝明(1998). "特輯-生態系モデルって何?", 海洋と生物, 第118卷 第20-5號, pp 355~389.

日本氣象協會(1996). "福岡市氣象月報(1996年 4月~1997年 3月)".

內田唯史, 浮田正夫, 關根雅彦, 中西 弘(1994). "富營養化海域の水質的非線形特性とそのモデリングに関する研究", 日本土木學會論文集, Vol. 503/II-29, pp 187~195.

山下隆男, 福神和興(1999). "硅藻類-渦鞭毛藻類の種間競争を考慮した田辺灣の赤潮モデル", 日本土木學海岸工學論文集, 第46卷, pp 1026~1030.

2001년 9월 25일 원고 접수
2001년 11월 8일 수정본 채택