

洛東江 河口海域의 식물플랑크톤 極大域 變動에 관한 數値시뮬레이션

- II. 식물플랑크톤 극대역 변동의 수치시뮬레이션 -

이 대 인 · 김 동 명 · 김 형 철 · 이 석 모 · 박 청 길
부경대학교 환경공학과
(2000년 6월 8일 접수)

The numerical simulation on variation of phytoplankton maximum region in the estuary of Nakdong river

- II. The numerical simulation on variation of phytoplankton maximum region -

Dae-In Lee, Dong-Myung Kim, Hyung-Chul Kim, Suk-Mo Lee and Chung-Kil Park

Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National Univ., Pusan, 608-737, Korea

(Manuscript received 8 June, 2000)

It is very important to interpret and simulate the variation of phytoplankton maximum region for the prediction and control of red tide.

This study was composed of two parts, first, the hydrodynamic simulation such as residual current and salinity diffusion, and second, the ecological simulation such as phytoplankton distribution according to freshwater discharge and pollutant loads.

Without the Nakdong river discharge, residual current was stagnated in inner side of this estuary, and surface distribution of salinity was over 25psu. On the contrary, with summer mean discharge, freshwater stretched very far outward and some waters flowed into Chinhae Bay through the Kadok channel, and low salinity extended over coastal sea and salinity front occurred.

From the result of contributed physical process to phytoplankton biomass, the accumulation was occurred at the west part of this estuary and the Kadok channel with the Nakdong river discharge. When more increased input discharge, the accumulation band was transported to outer side of this estuary. The frequently outbreak of red tide in this area is caused by accumulation of physical processes.

The phytoplankton maximum region located inner side of this estuary without the Nakdong river discharge and with mean discharge of winter, but it was moved to outer side when mean discharge of the Nakdong river was increased. The variation of input concentration from the land loads was not largely influenced on phytoplankton biomass and location of maximum region. When discharge was increased, phytoplankton maximum region was transferred to inner side of the Kadok channel. On the other hand, when discharge was decreased, phytoplankton maximum region was transferred to inner side of this estuary and chlorophyll *a* contents increased to over 20 μ g/L. Therefore, if any other conditions are favorable for growth of phytoplankton, decrease of discharge causes to increase of possibility of red tide outbreak.

Key words : Phytoplankton maximum region, Hydrodynamic simulation, Ecological simulation, Residual current, Front, Accumulation

1. 서 론

낙동강 하구해역에 있어서 식물플랑크톤의 극대역 변동은 낙동강 유출 부하량의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이러한 배경하에서 본 연구에서는 생태계모델

을 이용해서 식물플랑크톤의 극대역 변동을 수치적으로 시뮬레이션하였다.

육상유입부하에 민감하게 반응하는 하구해역의 특징적인 수질현상을 규명하기 위해서는 그 원인과 환경인

자의 변동에 따른 영향을 생태-유체역학 모델을 이용해서 물리적, 생태학적으로 예측하여 수질관리방안을 제시할 필요가 있다. 이러한 모델을 이용한 연구로는 Cerco¹²⁾가 CE-QUAL-ICM 모델을 사용해서 체사피이크만의 부영양화 현상의 장기 전망과 영양염 부하감소에 대한 응답에 관해 시뮬레이션하였고, 柳哲雄 等³⁾은 일본 세토내해의 Suo-nada와 Iyo-nada의 *Gymnodinium* 赤潮에 관한 수치시뮬레이션을 행하여 생태계모델은 적조현상 예측에도 적용되고 있다.

따라서, 본 연구는 낙동강 하구해역의 특성에 맞게 수정·보완된 생태-유체역학 모델(Eco-hydrodynamic model)을 이용하여 濃密한 Chlorophyll *a* 최대농도역, 즉, 식물플랑크톤 극대역의 형성과 그 변동에 영향을 줄 수 있는 수질환경적 요인인 영양염과 물리적 요인인 이류·확산과정의 변화에 따른 극대역 변동을 시뮬레이션해서 하구해역의 실제상황과 비교하고 그리고 식물플랑크톤 현존량에 대한 물리적 확산과 집적의 기여도를 공간적으로 평가해서 적조발생 가능성을 진단하고 적조의 확산과 예측 및 수질관리에 기여하고자 한다.

2. 적용 모델

2.1. 생태-유체역학 모델

생태-유체역학 모델(Eco-hydrodynamic model)은 해수유동 시뮬레이션을 위한 층계모델(Multi-level model:

COSMOS)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델(Ecosystem model: EUTRP 2)로 구성되어 있다. Fig. 1 과 같이 해수유동모델을 이용하여 조식류와 잔차류를 시뮬레이션하고 잔차류성분을 생태계모델의 유동장으로 입력하여 수질을 예측할 수 있다.

해수유동모델과 생태계모델의 개요 및 수식화는 이⁴⁾와 같다.

2.2. 생태계모델의 수정과 보완

본 연구에서는 기존에 개발된 생태계모델⁵⁾을 연구목적에 맞고 본 대상해역에 적용이 가능하도록 다음과 같이 수정·보완하였다.

첫째, 생태계모델의 구성요소의 초기치를 실측치를 토대로 공간적 분포와 수심별 분포를 고려해서 입력할 수 있도록 프로그램의 입력방식을 수정하였다. 둘째, 수온과 염분을 실측치를 토대로 공간적, 수심별로 다르게 입력할 수 있도록 수정하였다. 셋째, 식물플랑크톤의 실측자료를 바탕으로 적조발생원인 종과 우점종 조성분포를 파악해서 복수종을 고려할 수 있도록 식물플랑크톤에 관계된 중요한 parameter의 입력방식을 수정·보완하였다. 즉, 식물플랑크톤 최대성장속도(α_1), 식물플랑크톤 영양염 반포화상수(K_{SP} , K_{SN})를 공간적으로 다르게 입력하였다. 넷째, 동물플랑크톤도 서로 다른 종조성을 고려하여 동물플랑크톤 섭식속도(α_3)를 다르게 입력할

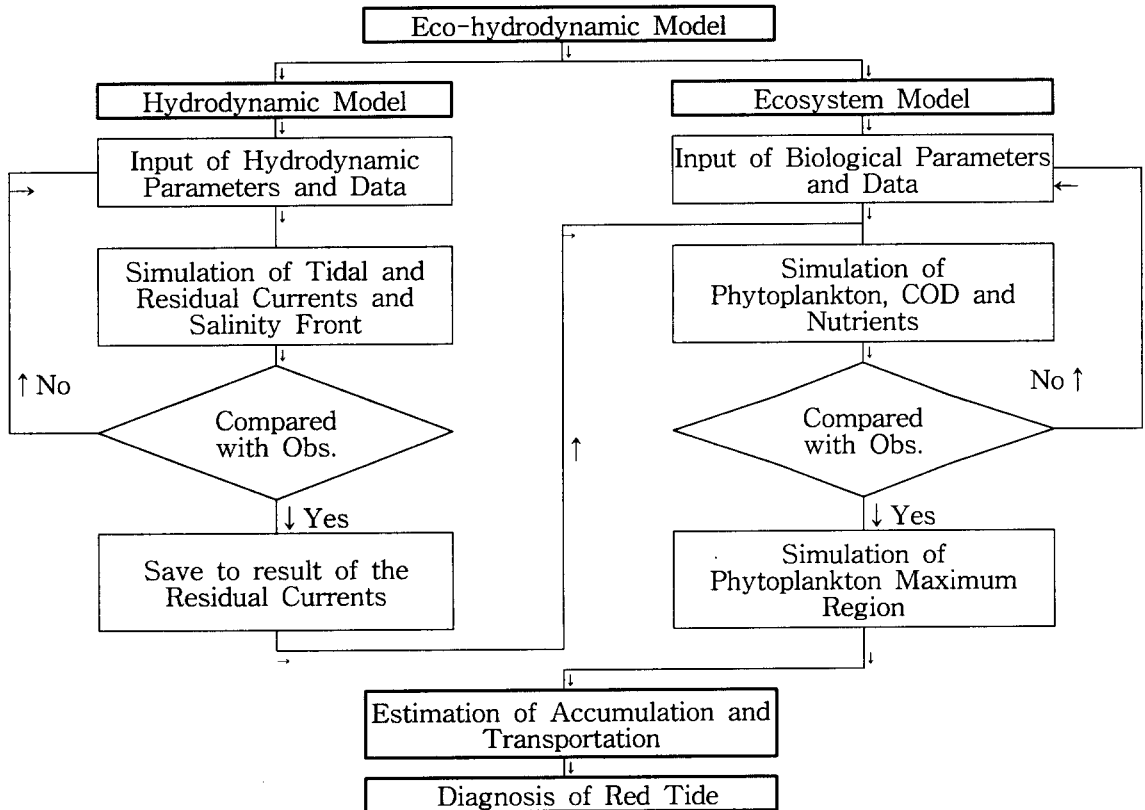


Fig. 1. The schematic diagram of an eco-hydrodynamic model for the flow of simulation.



Fig. 2. The finite-difference grid of the three-dimensional model in the study area.

수있도록 수정하였다. 다섯째, 저질 영양염용출량을 기존의 실측된 자료를 바탕으로 공간적 분포를 고려해서 입력할 수 있도록 보완하였다. 여섯째, 모델영역내의 각각의 격자점에서 생태계모델의 구성요소에 기여하는 물리과정량과 생물과정량을 출력할 수 있도록 프로그램을 보완하였고, 그 중에서 계산된 식물플랑크톤 현존량에 대해 물리적으로 집적될 수 있는 가능성이 큰지 확산될 수 있는 가능성이 큰지 평가하였다.

3. 시뮬레이션 방법

3.1. 해수유동모델의 시뮬레이션

광역해역의 모델영역은 Fig. 2와 같이 개방경계로는 건내량수로와 해운대, 거제도의 장승포 남단을 직각으로 연결한 선으로 하였다. 낙동강 하구해역의 모델영역은 광역해역의 모델영역에서 X방향은 격자번호 81~114, Y방향은 격자번호 1~57로 제한해서 고찰하였다.

모델영역내의 해수유동을 재현하기 위해서 입력한 자료는 Table 1과 같이 탁월분조인 M2분조를 이용했고 조위와 위상의 경계치는 정⁶⁾과 해양수산부⁷⁾의 자료를 이용했다. 육상의 하천을 통하여 모델영역내로 들어오는 담수유입원은 하구둑을 통한 낙동강 유출수와 장림하수처리장 유출수를 포함해서 총 45개를 고려했고 유량은 국립수산진흥원⁸⁾과 한국수자원공사⁹⁾ 등 각종 문헌조사를 통해서 입력하였고, 수온, 염소량 등 다른 입력자료는 실측치와 문헌조사를 통해서 적용하였다. 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙해서 없는 것으로 가정하여 해수유동을 시뮬레이션하였다. 3차원 해수유동모델을 이용하여 조석류와 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 조석을 조석주기로 평균해서 잔차류를 시뮬레이션하였다. 그 결과가 관측치와 어느 정도 일치하는지 알아보기 위해서 관측지점에서 실측된 유향과 유속을 시뮬레이션된 조류타원도와 상호비교하여 유동모델을 검증하였다.

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 500m$
Total mesh value	$154 \times 63 \times 3 = 29106$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	10sec
Level	1 : 0~5m 2 : 5~15m 3 : below 15m
Tidal level and degree at open boundary	A : 28.48cm, 228.2° B : 37.99cm, 243.9° C : 49.90cm, 242.7° D : 65.20cm, 242.6°
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 1~3 : 0.1 (cm ² /s)
Calculation time	10 tidal cycles

낙동강 하구해역의 염분확산을 시뮬레이션하기 위해서 Table 2를 참고로 해서 낙동강의 유입 방류량이 없을 때와 하계 일평균 방류량을 고려했을 때 염분전선의 거동을 파악하여 육상유입부하가 미치는 영향권을 알아 보았다.

Table 2. The estimation of discharge and pollutant Jangrim wastewater treatment plant effluent

		Jangrim wastewater treatment plant effluent			Jangrim wastewater treatment plant effluent		
		Nakdong river ¹⁰⁾					
Mean discharge (m ³ /day)	Summer	55,344,015			302,493		
	Winter	8,840,192					
	Autumn	25,809,755					
	Summer, 1997	82,613,550					
	Summer, 1998	158,727,333					
Input concentration (mg/L)	Summer	COD 6.20	TN 4.25	TP 0.085	COD 24.50	TN 52.95	TP 1.065
	maximum	9.80	6.43	0.749			
	minimum	4.60	1.93	0.009			

Table 3. Input data for an ecosystem model

Parameters		Input values							
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 500m$							
Water depth		chart datum + MSL							
Time interval		450sec							
Pollutant loads ⁴⁾									
Initial condition for compartments									
Level	DO (mg/l)	COD	DIP ($\mu g-at/l$)	DIN	POC	DOC (mg-C/m ³)	PHYTO	ZOO	
1	5.77~	0.58~	0.07~	0.23~	132.35~	1170.00~	27.90~	50.00	
	12.09	8.18	3.27	176.39	2000.00	3255.00	1081.60		
2	4.39~	1.28~	0.13~	0.09~	125.20~	780.00~	28.40~	50.00	
	9.63	5.76	2.92	61.82	500.00	2719.00	596.70		
3	1.62~	1.08~	0.15~	4.37~	74.05~	800.00~	6.00~	100.00	
	8.83	5.64	2.06	40.29	500.00	2558.00	393.60		
Boundary condition for compartments									
Level	DO (mg/l)	COD	DIP ($\mu g-at/l$)	DIN	POC ()	DOC (mg-C/m ³)	PHYTO ()	ZOO ()	
1	9.29~	1.75	0.07~	0.23~	132.35	2570.00	27.90~	50.00	
	10.66		0.26	2.09			276.20		
2	8.21~	1.50	0.16~	0.09~	125.20	2575.00	28.40~	50.00	
	9.03		0.58	8.61			75.60		
3	7.70~	1.42	0.32~	4.37~	74.05	1370.00	6.00~	100.00	
	8.83		0.55	14.27			12.00		
D	1	8.95	1.92	0.39	9.53	2460.00	2540.00	127.80	50.00
	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 : 22.47~25.46°C, 3.38~34.02psu Level 2 : 17.22~22.47°C, 28.42~34.11psu Level 3 : 13.60~19.91°C, 29.97~34.45psu				
Calculation time					200 tidal cycles				

3.2. 생태계모델의 시뮬레이션

생태계모델에 사용된 초기치와 경계치는 Table 3과 같이 대상해역의 실측치와 김¹⁰⁾과 부경대학교 해양과학공동연구소¹¹⁾의 자료를 토대로 공간적인 분포를 고려하여 입력하였다. 물질의 수평 및 연직확산계수는 유동모델에 적용된 동일한 계수값을 사용하였다. 모델영역내로 유입되는 육상부하원은 낙동강 하구둑의 유출수와 장립하수처리장 유출수를 포함해서 총 45개로 고려하였고 생태계모델의 구성요소에 대한 부하량은 국립수산진흥원⁸⁾과 한국수자원공사⁹⁾ 등 각종 문헌조사한 값을 이용하였다. 대기로부터의 유입부하 등 비점오염부하는 고려하지 않았다. 대상해역내의 저질 영양염유출량은 김¹⁰⁾의 자료를 이용해서 암모니아는 14.87~36.37mg/m²/day를, 인산인은 7.04~9.90mg/m²/day로 해역별 특성을 고려해서 입력하였다. 확산계수 및 그 밖의 모델에 입력되는

파라메타는 기존의 측정된 자료와 문헌조사를 통하여 적절하게 선정하였다. 특히, 식물플랑크톤 최대성장속도, 동물플랑크톤 섭취속도, 인산인과 용존무기질소에 대한 반포화정수값은 대상해역의 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 우점종 조성을 고려해서 공간적으로 차이가 나게 입력하였다.

대상해역에서 하계에 우점하는 식물플랑크톤의 경우 *Skeletonema costatum*과 *Chaetoceros* spp., 그리고 동물플랑크톤의 경우는 *Noctiluca Scintillans*와 Copepods가 차지하는 비율이 높기 때문에 이들 종에 대한 계수값을 이용하였고, Chlorophyll a(mg/m³)와 식물플랑크톤의 탄소량(mgC/m³)에 대한 환산계수는 심 등¹²⁾이 천수만을 대상으로 조사한 C/Chl. a 비에서 하계 6월의 평균 측정값인 표층의 경우는 31, 중층은 27, 저층은 25를 적용하였다. 동물플랑크톤의 탄소함량은 실측치가 없어서

김¹⁰⁾의 자료를 이용하였다.

3.2.1. 생태계모델의 보정

생태계모델의 적용성을 높이기 위해서 낙동강의 하계 일평균 방류량을 고려하여 시뮬레이션된 구성요소값과 하구둑 방류량이 모델에 입력된 방류량과 유사한 시기인 4월의 실측값이 맞도록 생태계모델의 각종 계수값을 조절해가며 Calibration하였다.

3.2.2. 물질분포 시뮬레이션

생태계모델을 이용해서 무풍조건으로 낙동강 유입부 하가 없을 때와 하계 일평균 유입부하를 고려했을 때의 식물플랑크톤의 분포를 시뮬레이션하였다. 그리고 바람의 영향이 물질분포에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해서 하계의 탁월풍인 남남서풍 4.0m/s¹¹⁾를 입력하여 시뮬레이션하였다.

3.2.3. 식물플랑크톤의 집적과 확산

표층 식물플랑크톤의 분포에 대한 물리과정의 기여율을 파악해서 낙동강 유입부하의 변동에 따른 식물플랑크톤의 공간적인 확산과 집적에 대해 고찰하였다.

3.2.4. 식물플랑크톤 극대역 변동 시뮬레이션

식물플랑크톤의 우점종을 고려해서 그 중에 적절한 각종 파라메타를 입력하여 Table 2를 참고로 해서 낙동강 유입부하의 변동에 따른 식물플랑크톤 극대역의 변동을 시뮬레이션하고 실제 하구해역의 계절에 따른 변동상황과 비교하여 적조의 확산과 예측 가능성을 고찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 해수유동 시뮬레이션

4.1.1. 잔차류 시뮬레이션

연안해역의 물질분포에 큰 영향을 미치는 잔차류의 분포는 Fig. 3과 같이 낙동강 유입부하를 고려하지 않았을 때는 낙동강 하구해역 내측은 유속이 2cm/s이하의 정체현상을 보였으며, 가덕도 남단부근에서는 가덕수로에서 빠져나온 물과 거제도 동쪽에서 북향된 성분이 합쳐져서 동쪽으로 흘러감을 볼 수 있었다. 그러나, 낙동강의 하계 일평균 방류량을 고려했을 때는 낙동강 유출수가 가덕도 남단까지 최대 7cm/sec로 강하게 확산되고 일부는 가덕도 남단을 돌아서 가덕수로를 통해서 진행만으로 약 5cm/sec로 유입되어 하구해역 주변전체에 그 영향이 크게 미침을 보여주었다.

이렇게 시뮬레이션된 해수유동이 어느 정도 실제의 유동상황과 맞는지 알아보기 위해서 정점 EC1, EC4와 EC5에서 실측된 조류타원도와 낙동강의 하계 일평균 방류량을 고려해서 시뮬레이션된 조류타원도를 비교한 것을 Fig. 4에 나타내었다. 유속과 유향면에서 실측치와 계산치가 거의 일치하여 대상해역의 유동상황을 충분히 재현하고 있다고 판단되었다.

그리고 낙동강 수문을 개폐할 때 담수가 어느 정도까

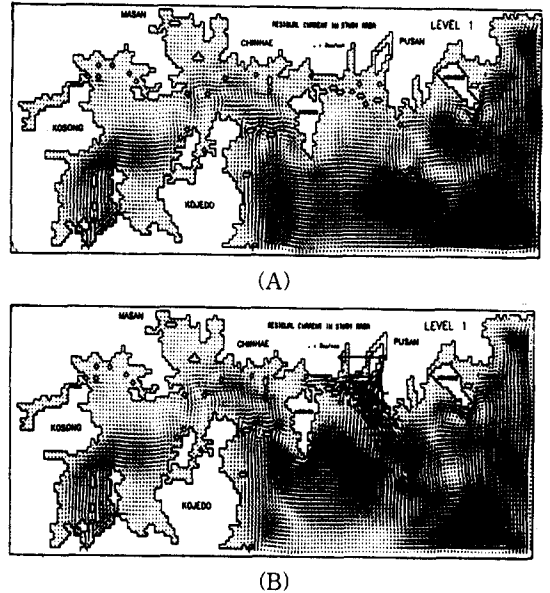


Fig. 3. The computed residual currents at surface level in the study area(A: without the Nakdong river discharge, B: with summer mean discharge of the Nakdong river).

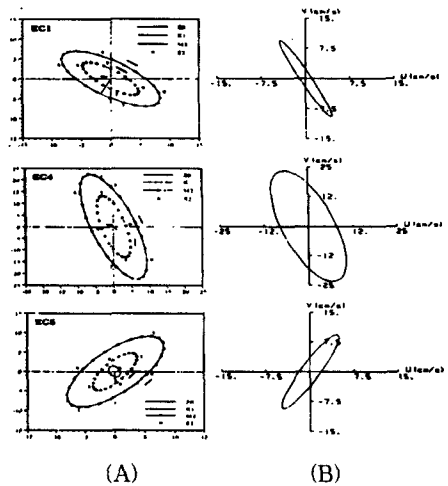


Fig. 4. The comparison of the tidal current ellipses between observed and computed results(A: observed, B: computed).

지 영향을 미치는가를 알아보기 위해서 염분의 확산경향을 살펴보았다. Fig. 5와 같이 낙동강 유입부하가 없을 때의 표층 염분분포는 대체적으로 25psu이상으로 하구해역 외측으로 갈수록 증가했지만, 낙동강의 하계 일평균 방류량을 고려했을 때는 하구해역 내측에는 10psu 이하의 저염수가 존재하고 여러 섬들주위에서 강한 염분전선이 형성되었고, 외양으로 갈수록 점점 염분이 증가되는 것을 뚜렷하게 볼 수 있었다. 이와 같이 하구둑

의 방류량에 따라서 낙동강 하구해역의 물질분포가 큰 영향을 받고 그 영향권이 축소·확장되는 양상을 나타내었다.

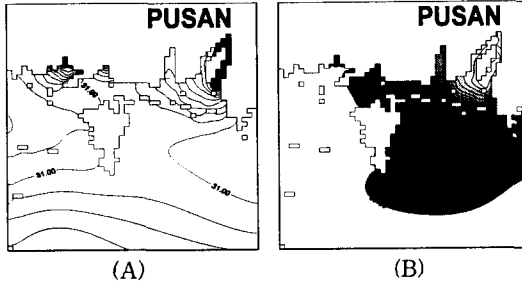


Fig. 5. The distribution of surface salinity(psu)(A: without the Nakdong river discharge, B: with summer mean discharge of the Nakdong river.

4.2. 생태계 시뮬레이션

4.2.1. 구성요소의 Calibration

생태계모델이 실제 낙동강 하구해역의 수질상황을 잘 재현하는지를 알아보기 위해서 육상유입원의 하계 일평균 유입부하량을 고려했을 때 낙동강 하구해역 주변의 총 23개 정점에서 예측된 층별 식물플랑크톤 현존량 값을 실제 하구둑 방류량이 모델에서 고려한 일평균 방류량과 유사한 시기인 4월의 실측치와 각각 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Comparison of simulation results with observed phytoplankton biomass at surface, middle and bottom levels in the study area

St.	Phytoplankton biomass($\mu\text{g}/\text{m}^3$)								
	Level 1			Level 2			Level 3		
	Computed	Observed	RE	Computed	Observed	RE	Computed	Observed	RE
A1	253.6	304.4	16.69	102.6	159.0	35.47	54.5	77.1	29.31
A3	99.2	139.5	28.89	56.9	80.0	28.88	15.0	30.0	50.00
B1	322.9	411.5	21.53						
B2	211.5	255.8	17.32	132.5	148.9	11.01	12.6	30.7	58.96
B3	169.7	200.0	15.15	161.7	207.0	21.88			
C2	332.2	349.4	4.92	276.8	265.0	35.02	117.1	90.6	29.25
C3	251.7	280.9	10.40	238.9	239.4	0.21			
C4	241.5	256.9	5.99						
C5	150.0	212.9	29.54						
D1	420.7	327.4	28.50	287.8	211.6	36.01	172.8	106.4	62.41
D2	370.1	347.0	6.66	336.8	290.0	16.14			
D3	316.1	270.9	16.69	309.2	266.8	49.52			
D5	265.0	231.3	14.57						
E1	488.2	430.9	13.30	371.3	312.2	18.93	383.3	288.1	36.52
E2	482.1	496.4	2.88						
E5	350.2	324.6	7.89						
F3	609.9	639.1	4.57	493.3	409.0	20.61	434.5	334.8	29.78
F4	644.3	617.0	4.42	491.7	468.2	5.02			
F5	666.9	548.2	21.65						
G2	520.5	577.8	9.92	440.8	532.1	17.16	442.4	299.4	47.76
G3	619.3	658.2	5.91	495.1	431.6	14.71	437.5	280.6	55.92
G4	674.9	660.0	2.26	519.1	366.2	41.75	486.8	393.6	23.68
G5	714.8	644.1	10.98	634.8	569.7	11.43			
Mean	398.9	399.3	13.08	334.3	302.3	22.73	256.7	193.1	42.36

식물플랑크톤의 경우 예측치와 실측치의 상대오차(Relative Error)가 1층의 경우는 13.08%로 매우 유사하게 재현되었고, 2층의 경우는 22.73%, 그리고 3층의 경우는 42.36% 정도로 나타났다. 부영양화 또는 수질의 응답성은 일반적으로 표층의 상황에 크게 주목을 하기 때문에 본 생태계모델은 대상해역의 식물플랑크톤의 분포 상황을 잘 반영하고 있다고 판단되었다.

4.2.2. 물질분포 시뮬레이션

식물플랑크톤의 분포를 살펴보면, Fig. 6과 같이 낙동강의 유입부하를 고려하지 않았을 때는 하구해역에서는 내측에서 $20.97\mu\text{g}/\ell$ 이상의 농도를 보이다가 점차 외측으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다.

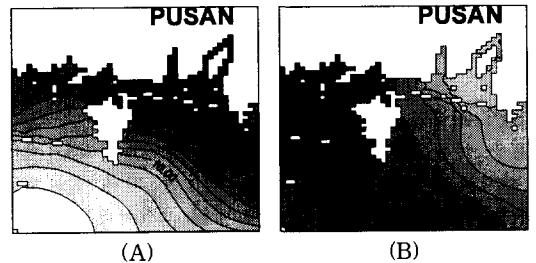


Fig. 6. Simulation results of surface chlorophyll $a(\mu\text{g}/\ell)$ in the study area(A: without the Nakdong river discharge, B: with summer mean discharge of the Nakdong river).

이러한 상태에서 낙동강의 일평균 방류량을 고려했을 때는 낙동강 하구해역 내측에는 하구둑의 방류량에 의한 썩김작용으로 식물플랑크톤의 체류시간이 감소함으로써 그 농도가 $3.23\mu\text{g}/\ell$ 로 급격하게 낮아지는 양상을 보였고, 점차 외측으로 갈수록 증가하는 양상을 나타내어 이 방류량과 유사했던 4월의 실제 상황과 유사하였다.

모델영역내에서 바람의 영향이 식물플랑크톤의 분포에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해서 1987~1996년간 부산지방의 월별 기상자료 분석결과 탁월풍인 남남서(SSW)풍 $4.0\text{m}/\text{sec}$ 를 입력하여 시뮬레이션된 식물플랑크톤 분포를 Fig. 7에 제시하였다.

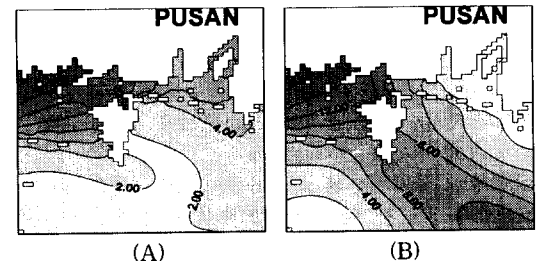


Fig. 7. Simulation results of surface chlorophyll $a(\mu\text{g}/\ell)$ with $4.0\text{m}/\text{s}$ SSW wind in the study area(A: without the Nakdong river discharge, B: with summer mean discharge of the Nakdong river).

전체적으로 바람의 영향은 식물플랑크톤의 농도분포를 낮게 하였고, 낙동강의 유입부하를 고려했을 때는 식물플랑크톤의 극대역이 가덕도 동남단주변에 형성되는 것으로 시뮬레이션되었다.

4.2.3. 식물플랑크톤의 집적과 확산

연구대상해역에서 이류·확산 등의 물리적 영향에 의해서 물질이 어떤 공간에서 집적될 것인가, 확산될 것인가를 식물플랑크톤 현존량에 대한 물리과정의 비율로서 평가한 것을 Fig. 8에 나타내었다.

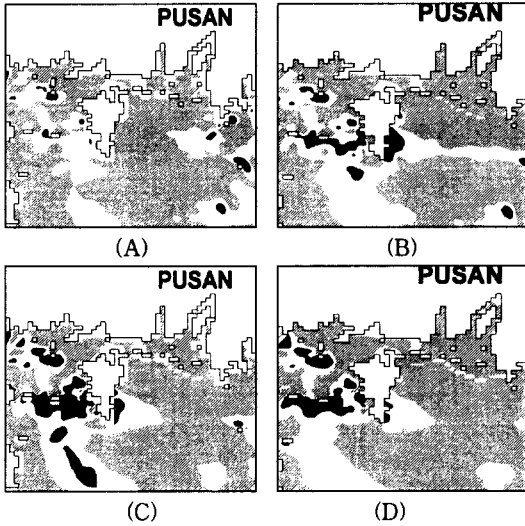


Fig. 8. The distribution of contributed physical process to chlorophyll a at surface level according to variation of the Nakdong river discharge in the model area: filled area, accumulation; slanted area, transportation; blanked area, balance accumulation with transportation(A: without the Nakdong river discharge, B: mean discharge of autumn, C: mean discharge of summer, D: summer, 1997).

즉, 계산된 식물플랑크톤 현존량에 대한 물리과정의 기여율이 (+)가 되는 항은 물리적인 과정에 의해 증가되므로 물리적인 집적과정이라 판단되고, (-)항은 반대로 물리적 과정에 의해 어떤 공간에서 확산된다고 할 수 있다. 그리고 물리과정의 비율이 0이 되면 확산과 집적이 평형을 이룬다고 평가할 수 있겠다. 이러한 관점에서 낙동강의 유입부하를 고려하지 않았을 때는 (A)와 같이 낙동강 하구해역의 다대포 남단주위와 가덕수로는 집적과 확산의 평형이 일어나는 것으로 시뮬레이션되었고, 그 외 대부분의 장소에서는 확산되어진다고 할 수 있었다. 그러나, (B)와 같이 낙동강의 일평균 방류량을 추계수준인 약 2600만톤으로 증가하였을 때는 가덕도의 동쪽 연안과 가덕수로 부근에서 물질의 집적 현상이 나타났는데, 이러한 분포는 이 방류량과 유사했

던 1998년 6월의 Chlorophyll a의 극대역 분포와 유사함을 나타내었다. 또한 (C)와 (D)처럼 일평균 방류량을 각각 약 5500만톤 및 8000만톤으로 증가하면 이러한 집적 장소가 가덕도 남단 및 가덕수로 안쪽으로 轉移하는 것으로 나타났고, 이러한 방류량과 유사했던 1998년 4월의 Chlorophyll a의 극대역 분포지역과 어느 정도 상관성이 있는 것으로 나타났다. 즉, 낙동강의 유출수와 해양 물리과정이 복합적으로 연계되어 하구해역의 특정한 공간상에 물질이 집적될 수 있음을 나타내었고, 이러한 장소가 방류량의 증가에 의해 하구해역 내측과 외측사이에서 이동되는 양상을 보여주었다.

이러한 물질이 집적될 수 있는 장소는 실제 대상해역에서의 적조가 빈발하는 장소와 유사하게 증명되었고, 따라서 이것은 표층 식물플랑크톤이 현장해역에서 물리적인 영향에 의해서 다른 장소로 확산되는 것보다 쉽게 집적될 수 있다는 것을 암시하므로 적조의 발생과 확산에 중요한 의미를 내포한다고 할 수 있다.

4.2.4. 식물플랑크톤 극대역 변동 시뮬레이션

실제 낙동강 하구해역 내측과 외측 그리고 특정 공간에 농밀한 식물플랑크톤 분포가 어떻게 해서 나타나고 이동되는지를 시뮬레이션을 통하여 알아보기 위하여 Table 2와 같이 육상유입원의 유입농도 변화와 방류량의 변화에 따라서 예측하여 실제상황과 비교해 보았고 나아가서 적조발생가능성을 유추해 보았다.

1) 일평균 방류량에서 오염물질의 평균유입농도가 일년 중 최대일 경우와 90% 증가했을 경우

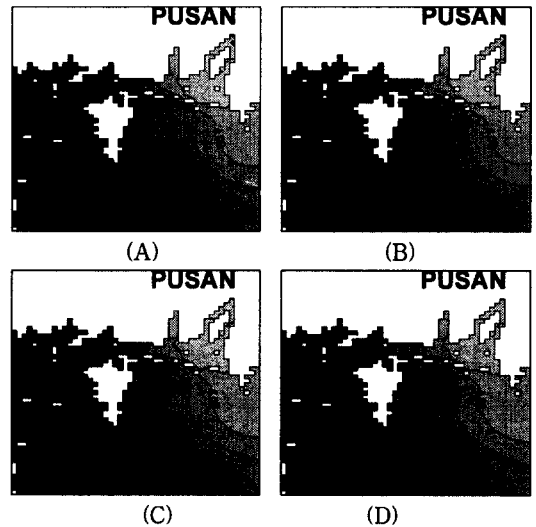


Fig. 9. The distribution of surface chlorophyll a(µg/l) according to variation of pollutant mean concentration from the Nakdong river(A: maximum input conc., B: 90% increase, C: minimum input conc., D: 90% reduction).

육상유입원의 오염물질 유입농도가 연 중 최대를 나타낼 때와 현재 수준보다 90% 증가되어 수질이 악화된 상황을 가정해서 시물레이션을 실시해도 Fig. 9의 (A), (B)와 같이 식물플랑크톤의 농도는 큰 증가가 보이지 않았을 뿐만아니라 극대역의 위치변화도 없는 것으로 예측되었다.

2) 일평균 방류량에서 오염물질의 평균유입농도가 일년 중 최소일 경우와 90% 저감했을 경우

Fig. 9의 (C)와 (D)와 같이 유입농도가 현재 수준보다 감소해도 내측에는 뚜렷한 식물플랑크톤의 농도감소는 보이지 않았고 극대역도 변동되지 않는 것으로 시물레이션되었다.

3) 일평균 방류량이 1997년과 1998년의 하계와 같이 증가했을 경우

현재의 오염물질 평균 유입농도에서 낙동강의 방류량이 97년 하계수준으로 증가했을 경우는 Fig. 10의 (A)와 같이 내측은 약 $0.83\mu\text{g}/\text{l}$ 로 급격하게 감소하고 외측은 $1.71\mu\text{g}/\text{l}$ 로 감소하는 것으로 나타났다. 만약 98년 하계와 같이 방류량이 더 크게 증가된다면, Fig. 10의 (B)와 같이 가덕도 남단까지 담수의 영향이 미쳐 식물플랑크톤은 약 $0.48\mu\text{g}/\text{l}$ 이하로 급속하게 감소하는 상황이 시물레이션되었다. 따라서, 하구해역의 식물플랑크톤의 극대역은 사라지는 것으로 예측되었다.

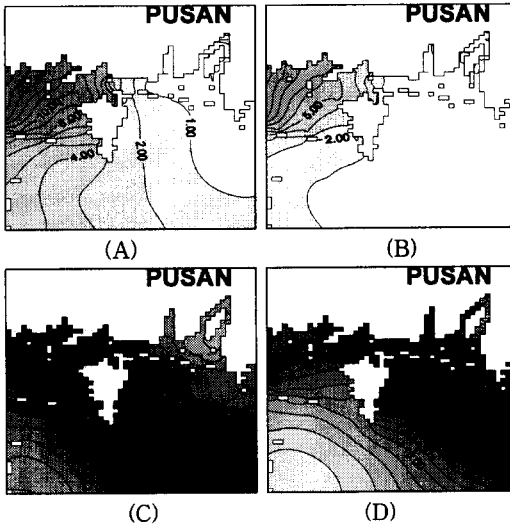


Fig. 10. The distribution of surface chlorophyll *a* ($\mu\text{g}/\text{l}$) according to variation of the Nakdong river discharge(A: summer, 1997, B: summer, 1998, C: mean discharge of autumn, D: mean discharge of winter).

4) 일평균 방류량을 추계 평균량과 동계 평균량으로 고려했을 경우

Fig. 10의 (C)와 같이 추계수준인 약 2500만톤으로

감소한 경우 내측의 농도분포는 $7.60\mu\text{g}/\text{l}$, 외측은 $16.22\mu\text{g}/\text{l}$ 로 급격하게 증가하였다. 또한, 식물플랑크톤의 극대역도 가덕도 남동쪽의 특정 공간으로 이동하였는데, 이 결과는 시물레이션에서 고려한 방류량과 유사했던 1998년 6월의 식물플랑크톤 극대역을 나타낸 장소와 비교하면 다소의 차이는 있지만, 방류량의 오차와 해역의 크기를 감안하면 가덕도 동쪽의 하구해역 특정 공간상에 농밀한 식물플랑크톤의 극대역이 시물레이션되었고 판단되었다. 이러한 장소는 실제 낙동강 하구해역에서 적조가 빈발하는 지역과 유사하였다. 한편, 갈수기인 동계수준인 약 900만톤으로 감소된다면, 식물플랑크톤의 농도는 Fig. 10의 (D)와 같이 내측이 $20.61\mu\text{g}/\text{l}$, 외측이 $16.51\mu\text{g}/\text{l}$ 로 정체된 내만과 같아져서 식물플랑크톤의 급증이 예상되며, 식물플랑크톤의 극대역도 실제 2월과 같이 점점 하구해역 내측으로 이동하는 양상을 나타내어 식물플랑크톤의 대량증식 가능성이 아주 높아질 것으로 예측되었다.

이상의 결과로부터 본 대상해역에서는 식물플랑크톤 증식을 위한 영양염은 충분히 만족된 상태의 과영양역이라서 일사량 및 물리적 안정조건이 형성되면 식물플랑크톤의 대량증식이 가능하다고 판단되었다. 방류량의 증가는 물질의 체류시간 감소와 더불어 탁도증가와 염분의 감소작용으로 식물플랑크톤의 증식상황에 불리한 여건을 조성한다. 다시 방류량이 서서히 감소하고 일사량이 좋아지면 식물플랑크톤의 증식이 활발해져 적조발생 가능성을 높이는 상황이 반복되고 있다고 사료되어 이와 관련한 효과적인 수질관리가 필요하다 하겠다.

5. 결 론

낙동강 하구해역에 있어서 환경변화에 따른 식물플랑크톤 극대역 변동을 수치적으로 시물레이션하여 적조발생 가능성 진단과 물질집적에 대해서 연구한 결론은 다음과 같다.

1. 생태계모델을 수정·보완하여 육상유입원의 환경변화에 따라서 실제 하구해역 내측과 외측사이에서 轉移되는 식물플랑크톤 극대역을 시물레이션한 결과, 현재의 하계 일평균 방류량에서 오염물질의 유입농도변화는 식물플랑크톤의 극대역의 이동과 농도변화에 큰 영향이 없는 것으로 예측되었다.

2. 낙동강의 방류량이 추계 평균수준으로 감소되면 식물플랑크톤 극대역은 가덕도 남동쪽의 특정 공간상에 형성되었고, 갈수기인 동계 평균수준으로 감소된다면 식물플랑크톤 극대역은 점점 하구해역 내측으로 이동하여 식물플랑크톤의 급증이 예측되었다.

3. 낙동강의 일평균 방류량이 풍수기였던 1997년과 1998년 하계수준으로 증가된다면, 식물플랑크톤의 농도도 급격하게 감소하고 극대역도 사라지는 것으로 시물레이션되었다.

4. 생태계모델을 이용한 Chlorophyll *a*에 대한 물리과정량 분포에서 낙동강의 일평균 방류량이 추계와 하계 평균수준이었을 때는 물질의 집적현상이 실제 Chlorophyll *a*의 최대분포지역인 가덕도 남단 및 가덕수로쪽에서 나

타났고, 이러한 지역에서 적조의 빈발은 물리과정의 영향이 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) Cerco, C. F., 1995, Simulation of Long-Term Trends in Chesapeake Bay Eutrophication. *Journal of Environmental Engineering*, 121(4), pp. 298~310.
- 2) Cerco, C. F., 1995, Response of Chesapeake Bay to Nutrient Load Reductions. *Journal of Environmental Engineering*, 121(8), pp. 549~557.
- 3) 柳哲雄, 山本隆司, 小泉喜嗣, 池田武彦, 神齒眞人, 田森裕茂, 1993, 周防灘・伊予灘のギムノデイニウム赤潮の數値シミュレーション. *水産海洋研究*, 57(4), 319~331.
- 4) 이대인, 2000, 洛東江 河口海域의 식물플랑크톤 極大域 變動에 관한 數値시뮬레이션. 부경대학교 대학원 박사학위논문, 131pp.
- 5) 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.
- 6) 정연철, 1997, 실시간 유출유 확산모델링에 관한 연구. 부경대학교 대학원 박사학위논문, 126pp.
- 7) 해양수산부, 1997, 부산신항 개발사업 환경영향 평가서. 949pp.
- 8) 국립수산진흥원, 1995, 富營養化 및 赤潮現象 糾明에 관한 研究. 254pp.
- 9) 한국수자원공사, 1995~1998, 낙동강 하구둑 관리연보. 한국수자원공사 하구둑 관리사무소.
- 10) 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링. 부산수산대학교 대학원 박사 학위논문, 130pp.
- 11) 부경대학교 해양과학공동연구소, 1999, 釜山新港 建設事業에 따른 漁業被害調査 最終報告書. 1134pp.
- 12) 심재형, 심윤근, 1989, 천수만 일차생산자의 생물량: 식물플랑크톤 탄소량과 세포 개체수 및 클로로필과의 관계. *한국해양학회지*, 24, 194~205.