

군산 연안 해역에서의 부영양화 제어에 관한 연구

김종구·정태주
군산대학교 공과대학 토목환경공학부
(2003년 6월 30일 접수; 2003년 8월 11일 채택)

A study on Eutrophication control in coastal area of Gunsan

Jong-Gu Kim and Tae-Ju Jeong

Department of Civil & Environment Engineering, Gunsan National University, Gunsan 573-702, Korea

(Manuscript received 30 June, 2003; accepted 11 August, 2003)

Gunsan coastal area is one of region increasing pollution problems. To improve water quality, the reduction of these nutrients loads should be indispensable. In this study, the three-dimensional numerical hydrodynamic and ecosystem model were applied to analyze the processes affecting the eutrophication. In field survey, the average concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and dissolved inorganic phosphorus(DIP) at surface waters were found to be $0.43\text{mg}/\ell$ and $0.03\text{mg}/\ell$ respectively, which were exceeding second grade of water quality criteria. In hydrodynamic modelling, the comparison between the simulated and observed tidal ellipses showed fairly good agreement. The ecosystem model was calibrated with the observed data in study area. The simulated results of DIN were fairly good coincided with the observed values within relative error of 32.39%, correlation coefficient(r) of 0.99. In the case of DIP, the simulated results were fairly good coincided with the observed values within relative error of 24.26%, correlation coefficient(r) of 0.82. The simulations of DIN and DIP concentrations using ecosystem model were performed under the conditions of 20~80% reductions for pollutant loading. At simulation results, concentration of DIN and DIP were reduced to 20~80% and under 10% in case of the 80% reduction of pollutant loading, respectively.

Key words : Hydrodynamic model, Ecosystem model, Eutrophication, Pollutant load, Dissolved inorganic nitrogen (DIN), Dissolved inorganic phosphorus(DIP)

1. 서론

본 연구대상인 군산 하구연안은 한반도 서해중부에 위치한 금강과 황해가 만나는 전형적인 하구(Estuary)의 특성을 나타내는 지역이며, 1990년과 1992년부터 시작된 북·남측 도류제 공사로 인하여 군산항 주수로와 개야수로로 나누게 되었다. 군산항 주수로와 개야수로 사이에는 유부도를 포함하는 대죽사주가 발달되어 있으며, 개야수로 북측에는 동서방향의 간사지가 육지에서부터 개야도까지 발달되어 해수의 흐름을 제한하고 있다¹⁾.

하구연안은 상류에서 흘러오는 담수와 바다에서 밀려오는 해수가 섞여서 기수가 생기는 곳으로 해수 및 담수가 시시각각으로 교환되고, 조석현상으로 수심이 변하며 수온과 영양염류의 양이 급변하는 불안정한 생태계이다. 따라서 이를 구성하는 생태계도 담수생태계 및 해양생태계와는 다른 독특한 생태계를 형성하고 있는데 그 대표적인 특징을 외부환경의 잦은 변화에서 오는 환경의 압력으로 인하여 종의 다양성이 낮고 육지에서 운반되어온 풍부한 영양염으로 인하여 생산성이 높다는 것이다. 또한 하구연안은 외해와는 달리 오염물질의 이동을 지배하는 요인이 다양하고 혼합과정이 복잡하며, 해역에 유입된 물질의 분포양상이 불규칙하다.

연안 하구해역의 수질은 해수유동현상 이외에 해

Corresponding Author : Jong-Gu Kim, Department of Civil & Environment Engineering, Gunsan National University, Gunsan 573-702, Korea
Phone : +82-63-469-1874
E-mail : kjg466@kunsan.ac.kr

역에서의 화학적·생물학적 과정에 따라 영향을 받는다. 이는 수중생태계가 유기물의 유입에 의한 화학적 분해과정을 통해 산소가 소모되고 이로 인해 수중생물에 영향을 미치고 있기 때문이다. 이 중 해양에서 생태계의 생산성을 제한할 수 있는 영양염류로는 질소화합물 및 인화합물을 들 수 있으며, 이들 영양염류는 해역에서 부영양화의 원인물질이 된다.

해역에서의 부영양화는 생산성이 낮은 해역에서 식물플랑크톤의 증식에 필요한 영양염류가 하천 및 기타 오염원을 통하여 유입되어 해역의 영양수준을 증가시키고 적당한 일사조건 하에서 식물플랑크톤이 짧은 시간에 대량으로 증가하여 해양생태계의 구성과 대사를 질적 양적으로 변화시키는 것으로 최초에는 호소학에서 발전되었다²⁾. 부영양화를 제어하고 저감하는 기술을 개발하기 위해서는 부영양화를 유발하는 물질의 유입 및 이동에 대한 정밀한 조사가 있어야 하며, 영양염과 식물플랑크톤과의 관계에 관한 생태계의 관련인자에 대한 연구를 통하여 이를 제어할 수 있는 대책방안을 밝혀야 한다³⁾.

해역의 수질 예측에 관련된 우리나라의 연구를 보면, 최⁴⁾가 최초로 3차원 물질 순환 모델을 이용하여 진해만에서의 빈산소수괴예측에 관하여 연구하였고, 김³⁾이 생태계모형을 이용하여 영양염 부하량에 따른 식물플랑크톤 농도를 예측하고 부영양화억제를 위한 방안을 제시한 바 있다. 또 김⁵⁾이 해수유동모델과 생태계모형을 이용하여 황해에 대하여 저층 용존산소를 5ppm으로 유지하기 위한 환경용량을 산정하였고, 조⁶⁾가 생태계 모형을 이용하여 어장의 최대 생산력을 산정하여 굴의 최대생산량을

계산하였으며, 김⁷⁾이 생태계 모형을 이용하여 황해 환경용량산정에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 부영양화 현상과 이로 인한 환경악화 현상과 관련된 오염부하량과의 관계를 정량적으로 파악하기 위하여 군산 연안 해역을 대상으로 3차원 해수유동모델(COSMOS)을 이용하여 3차원 해수유동을 재현한 후, 생태계모형(EUTRO)을 이용하여 식물 플랑크톤 및 영양염의 농도분포를 재현하였다. 그리고 금강에서의 오염부하가 부영양화에 미치는 영향을 정량적으로 평가함으로써, 부영양화 발생을 제어할 수 있는 보다 적절한 수질관리 대책을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지역

본 연구 대상지역은 북으로 충청남도 비인항 부근에서 남으로 전라북도 비응도 주변해역이다. 이 지역은 금강하구에서 담수가 유입되며 주변에 군장산업기지가 인접해 있고, 비응도 아래 지역은 새만금 간척사업이 이루어지고 있다.

2.2. 해역의 수질 평가 자료

군산 연안 해역의 수질 특성을 알아보기 위하여 Fig.1에 도시한 10개 정점에 대한 국립수산물과학원⁸⁾ 측정망자료를 이용하여 대상해역의 수질 특성을 평가하였고, 부영양화 모델의 입력자료로 사용하였다.

2.3. 모델 입력 자료

2.3.1. 3차원 해수유동 모델

본 연구의 모델 계산영역은 남북으로 군산시 비응도에서 시천군 비인항까지, 동서로는 금강 하구에서 연도까지를 대상해역으로 하였다.

대상해역의 x, y 방향의 격자크기는 해안선 굴곡을 충분히 고려할 수 있도록 300m로 하였으며, 표·저층의 유동특성을 상세히 재현하고 표층에서 유광층 깊이를 고려하여 3층으로 구분하였다. 계산되는 총격자수는 33,000개(110×100×3)로 구성하였다 (Fig. 2).

해수유동모델의 입력자료는 Table 1에 제시하였다. 수온과 염분의 계산영역 내 초기값과 외해의 경계값은 실측자료를 이용하여 각 층별로 일정한 값을 주었다. 각 층에서 수온은 20℃, 염분은 18‰를 적용하였다. 수심자료는 국립해양조사원에서 측량한 자료를 사용하였다. Coriolis parameter는 Shin and Yanagi⁹⁾가 새만금 외해역을 대상으로 적용한 $f = 8.55 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 을 적용하였다. 해저마찰계수는 Choi¹⁰⁾가 황해에서 $k=0.025$ 의 동일값을 적용하여 관측치와 일치하는 M_2 분조를 계산하였고, Choi¹¹⁾는

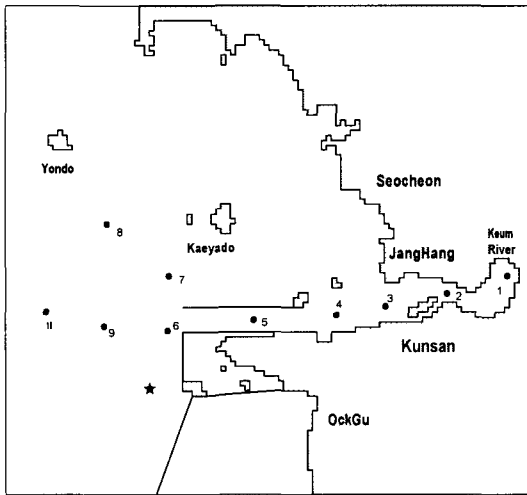


Fig. 1. The map of study area.

동지해에서 여러 k값을 적용한 결과 k=0.025에서 관측값과 계산값이 잘 일치한다고 보고하였다. 또한 황해를 대상으로 연구한 김⁵⁾과 김⁷⁾이 k = 0.0025를 적용하였다. 본 연구 대상해역 주변해역인 새만금 매립예정해역을 대상으로 Shin and Yanagi⁹⁾는 k = 0.026을 적용하여 관측치와 일치되는 조석류를 계산하였다. 따라서 본 연구에서는 유사해역에서 적용한 k=0.026을 적용하였다. 수평확산계수는 농립수산부¹²⁾에서 새만금 주변해역에서 실측한 자료가 $6.06 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 이며, Shin and Yanagi⁹⁾는 $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 값을 사용하였으나, 본 모델에서는 실측자료를 바탕으로 모델의 특성을 고려하여 $4 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 적용하였다. 연직확산계수의 경우 1cm/s 및 10cm/s는 완전 혼합 조건을 나타내고, 0.1cm/s는 완만한 혼합조건을 나타낸다고 中田¹³⁾은 보고하였다. 본 해역은 담수가 유입되는 하구조건으로 혼합이 원활하게 이루어지는 것으로 가정하여 1cm/s 값을 적용하였다. 하천을 통한 담수유입량은 농업기반공사¹⁴⁾에서 실측한 방류량 자료를 적용하였다. 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙해서 없는 것으로 가정하였다.

3차원 해수유동모델에서 계산된 조석류가 정상상태에 도달한 후 마지막 한 조석을 평균해서 잔차류를 계산하였다. 그리고 조석류가 재현한 유동특성이 해역의 유동을 잘 재현하는지 평가하기 위하여 Fig.1에 나타난 관측지점(★)에서 실측된 유향과 유속을 모의한 조류타원도와 비교하여 유동모델을 검증하였다.

2.3.2. 생태계 모델

생태계모델의 모델영역은 해수유동모델에 사용된

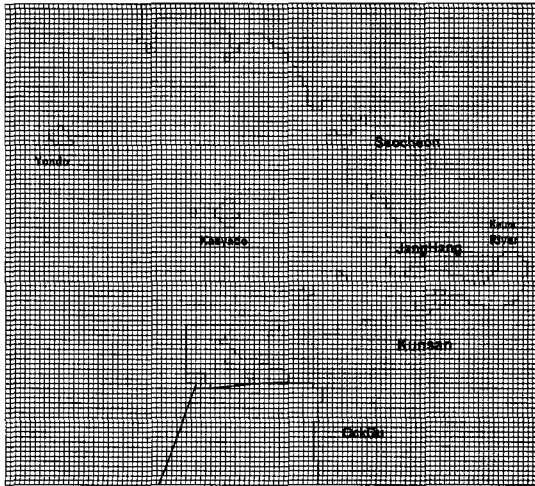


Fig. 2. Finite-difference grid of the three-dimensional model.

격자망과 동일하게 구성하였다. 각 층별 수질인자의 초기농도와 경계농도는 대상해역의 실측치를 토대로 공간적인 분포를 고려하여 보간법으로 계산하여 입력하였다(Table 2).

2.3.3. 유입부하량 및 모델 입력인자

2.3.3.1. 하천 유입부하

모델 영역내로 유입되는 육상부하원으로 금강하구둑의 유출수를 고려하였고, 모델의 구성요소에 대한 영양염의 부하 농도는 농어촌진흥공사¹⁴⁾에서 실측한 자료를 이용하였다. POC와 DOC는 환경부¹⁵⁾에서 실측한 자료를 이용하였다. 대기로부터의 유입부하 및 비점원 오염부하는 고려하지 않았다(Table 3).

2.3.3.2. 생물학적 Parameter

모델에 적용된 parameter는 관련 논문에서 인용된 자료 및 문헌조사를 통하여 산정하였으며, 적용된 계수는 Table 4에 나타내었다.

식물플랑크톤 성장속도의 온도 의존성을 지수함수로 표현한 대부분의 모델들은 20℃를 기준으로 하고 있으나, Eppley¹⁶⁾와 Thomann et al.¹⁷⁾은 0℃를 기준으로 하고 있다. Eppley¹⁶⁾는 다양한 종에 관한 많은 연구 결과로부터 0℃의 최대성장속도는 0.59/day이라 했는데, 20℃로 환산할 경우 2.09/day가 된

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 300\text{m}$
Total mesh	$110 \times 100 \times 3 = 33000$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	10sec
Level	1 : 0 ~ 3m 2 : 3 ~ 4m 3 : below 4m
Tidal level and degree at open boundary	205~210cm, 75.0~76.25° 205 cm, 68.0~76.0° 205 ~ 210cm, 68.0 ~ 70.0°
Water temperature and salinity at open boundary	level 1, 2, 3 : 20℃, 18‰
Coriolis coefficient	$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\phi$
Surface & Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0026
Horizontal viscosity coefficient	4.0E4 (cm ² /s)
Diffusion coefficient	4.0E4 (cm ² /s)
Wind speed	None
Calculation time	40 tidal cycle

Table 2. Input data for eutrophication model

Parameter		Input values							
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 300m$							
Water depth		chart datum + MSL							
Time interval		1200sec							
Initial condition for compartments									
level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	(mg/ℓ)		(mmole/m ³)		(mg-C/m ³)	
1~3	8.32	1.68	0.782	4.372	400.0	1400.0	30	15	
Boundary condition for compartments									
level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO	
	(mg/ℓ)		(mmole/m ³)		(mg-C/m ³)	
A	1	8.44	1.57	0.782	4.373	400	1400	22	11
	2	8.44	1.57	0.782	4.373	400	1400	22	11
	3	8.15	1.90	0.790	4.839	400	1400	22	11
B	1	8.44	1.57	0.782	4.373	400	1400	22	11
	2	8.44	1.57	0.782	4.373	400	1400	22	11
	3	8.15	1.90	0.790	4.839	400	1400	22	11
C	1	8.44	1.57	0.782	4.373	400	1400	22	11
	2	8.44	1.57	0.782	4.373	400	1400	22	11
	3	8.15	1.90	0.790	4.839	400	1400	22	11
Horizontal viscosity coefficient					4.0 E4(cm ² /s)				
Horizontal diffusion coefficient					4.0 E4(cm ² /s)				
Vertical diffusion coefficient					level 1~3 : 1.0(cm ² /s)				
Calculation time					40 tidal cycles				

Table 3. Flow and pollutant loads of rivers flowing into study area

Name of river	Pollutant loads						
	River flow	COD	DO	DIP	DIN	POC	DOC
	m ³ /day	(ton/day)		(kg/day)
Keum River	1.79E+7	102.7	228.4	499	48544	32025	41890

다. 한편 Goldman and Carpenter¹⁸⁾는 20℃에서 0.2~8.0/day범위를 제시하였다. 본 모델에서 최대성장속도는 1.55/day를 적용하였다.

식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사멸속도는 본 모델에서 온도의 함수로 취급하였으나, 불명확한 점이 많고 일반적으로 상수로 취급하고 있다. 식물플랑크톤의 경우 Thomann et al.¹⁷⁾은 0.02/day, Scavia and Eadie¹⁹⁾는 0.03/day, Jørgensen²⁰⁾은 0.01~0.1/day로 제시하고 있다. 본 모델에서는 식물플랑크톤의 사멸속도로 0.01/day를 적용하였다. 본 모델에서는 동물플랑크톤의 사멸속도로 0.018/day를 적용하였다. 저질에서의 영양염 용출부하량은 계절별, 계절별로 큰 변화가 있으며 외해역에서는 거의 용출이 일어나지 않으므로 본 연구에서는 고려하지 않

았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 해역 수질특성

군산 연안 해역의 수질특성을 알아보기 위하여 국립수산과학원⁸⁾에서 측정한 자료를 사용하여 10개 정점의 수질의 분석자료에 대한 월별 범위 및 평균값을 Table 5에 나타내었다.

담수의 영향을 직접적으로 나타내어 수괴의 특성을 구명하는 중요한 인자인 염분은 연평균 12.50~31.79‰(평균 27.24‰)의 범위를 나타내었다. 계절별로 하구 안쪽이 하천 유입수의 영향으로 낮고 외해로 갈수록 높은 경향을 보였다. 계절별로는 하계 장마로 인해 낮았다.

Table 4. The biological parameters used in an ecosystem model

Symbol	Definition	Unit	Input values	Typical values
α_1	maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	1.55	0.060~5.650
β_1	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0633	
α_2	respiration rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.010	0.030~0.051
β_2	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0524	0.044~0.0524
α_3	maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.180	0.18
β_3	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0693	0.058~0.120
α_4	death rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.010	0.096~0.330
β_4	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0693	
α_5	natural death rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.050	0.003~0.096
β_5	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0693	
α_6	mineralization rate of POC at 0°C	day ⁻¹	0.010	0.001~0.237
β_6	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.08	0.041~0.070
α_7	mineralization rate of DOC at 0°C	day ⁻¹	0.043	0.013~0.043
β_7	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0693	
α_8	oxygen consumption rate of sediment at 0°C	day ⁻¹	1.000	
β_8	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0693	
K_{SP}	half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ -P at 0°C	μg-at/ℓ	0.40	0.008~0.530
K_{SN}	half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	μg-at/ℓ	0.50	0.300~1.462
I_{opt}	optimum intensity of radiation for photosynthesis	ly/day	0.510	11,800~30,200
I_{max}	maximum intensity of sunlight at sea surface	cal/cm ² ·day	700.0	700
D	length of day	day	0.583	
k_0	dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m ⁻¹	0.570	0.170~2.000
γ	constant of dissipation coefficient depending on Chl.a	m ⁻¹ (mg Chl.a/m ³) ⁻¹	0.0179	
k	Ivlev index of zooplankton grazing	(mg C/m ³) ⁻¹	0.01	0.4E-3~25E-3
P^*	function of grazing	mg C/m ³	75.0	40.0~190.0
μ	digestion efficiency of zooplankton	%	70.0	39.0~98.0
λ	total growth efficiency of zooplankton	%	30.0	4.0~50.0
κ	percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC	%	25.0	21~35
K_{DO}^1	half concentration of DO for mineralization of POC	mg/ℓ	1.00	0.0035~1.000
K_{DO}^2	half concentration of DO for mineralization of DOC	mg/ℓ	1.00	0.0035~1.000
W_P	settling velocity of phytoplankton	m/day	0.150	0.005~0.4
W_{POC}	settling velocity of detritus(POC)	m/day	0.400	0.0~2.0
W_Z^1	maximum upward velocity at night for diurnal perpendicular motion of zooplankton	m/day	1000	
W_Z^2	maximum downward velocity in the daytime for diurnal perpendicular motion of zooplankton	m/day	1000	
K_a	reaeration coefficient at sea surface	day ⁻¹	0.25	0.025~0.650

Table 5. Range and mean values of water quality in the coastal area of Gunsan

Constituent (Unit)		Feb.	May.	Aug.	Nov.	Total
Sal. (‰)	Range	15.93~31.79	21.25~31.63	12.50~29.50	17.02~30.39	12.50~31.79
	Mean	28.34	29.11	24.82	26.66	27.24
COD (mg/ℓ)	Range	1.85~5.23	1.46~3.83	0.40~1.14	0.19~1.31	0.19~5.23
	Mean	3.03	2.26	0.76	0.78	1.71
Chl.a (mg/m ³)	Range	0.01~0.73	0.16~1.77	0.84~2.98	0.63~3.48	0.01~3.48
	Mean	0.18	0.53	1.84	1.37	0.98
NH ₄ ⁺ -N (mg/ℓ)	Range	0.01~0.78	0.00~0.24	0.13~0.31	0.01~0.22	0.00~0.78
	Mean	0.19	0.04	0.20	0.09	0.13
NO ₂ -N (mg/ℓ)	Range	0.01~0.04	0.00~0.04	0.00~0.03	0.01~0.08	0.00~0.08
	Mean	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
NO ₃ -N (mg/ℓ)	Range	0.16~1.73	0.02~0.35	0.01~0.26	0.08~1.38	0.01~1.73
	Mean	0.54	0.09	0.10	0.41	0.29
DIN (mg/ℓ)	Range	0.20~2.54	0.02~0.63	0.14~0.59	0.14~1.67	0.02~2.54
	Mean	0.74	0.13	0.31	0.52	0.43
DIP (mg/ℓ)	Range	0.03~0.05	0.00~0.02	0.03~0.07	0.00~0.02	0.00~0.07
	Mean	0.04	0.01	0.05	0.01	0.03

해역의 유기물량을 간접적으로 나타내어 유기오염 지표로 이용되는 화학적산소요구량(COD)의 연평균 농도범위는 0.19~5.23mg/ℓ (평균 1.71mg/ℓ)의 범위를 나타내었다. 계절별로는 동계와 춘계까지 높게 나타났으며, 하계에 상대적으로 낮았다. 동계에 금강하구 일부해역에서 해역수질기준 III등급수의 수질을 나타내었으나, 전체적으로 해역수질기준 I~II등급의 수질을 나타내었다.

해역에서 자생유기물질의 하나인 식물플랑크톤은 대체적으로 부영양화 된 해역에서 환경조건(일사량, 수온, 영양물질의 농도 등)이 적합할 때 대량으로 번식하는데 그 양은 엽록소(Chl-a)의 양으로 나타낸다. 본 조사해역에서 Chl-a의 평균농도는 0.01~3.48mg/m³(평균 0.98mg/m³)의 범위를 나타내었다. 계절별로는 하계에 식물플랑크톤의 생산력이 가장 크게 나타났고, 동계에 가장 낮았다. 전 지점에서 일본수산환경 수질기준(1973)의 적조발생 가능 농도인 10mg/m³ 보다 낮게 나타났다.

암모니아질소, 아질산질소, 질산질소의 합인 용존 무기질소(DIN)는 수중생물, 특히 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양원으로 해역에서 가장 부족하기 쉬운 원소로 알려져 있다. DIN은 생·화학적 작용에 의하여 순환하며 과다하게 존재하면 부영양해역이 되어 적조 발생의 원인으로 작용하게 된다. 조사해역의 DIN의 연평균 농도범위는 0.02~2.54mg/ℓ (평균 0.43mg/ℓ)의 범위를 나타내었다. 지점별로는 금강수가 유입하는 하구 안쪽이 높고 외해로 갈수록

급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

용존무기인(DIP)은 DIN과 함께 해양생물의 제한인자로 작용하는 중요한 영양염의 하나로 도시하수에 포함되어 있는 합성세제와 저층 퇴적물의 용출이 주부하원이다. DIP의 연평균 농도범위는 ND~0.07mg/ℓ (평균 0.03mg/ℓ)를 나타내었다. 계절별로는 하계와 동계가 높게 나타났고, 추계에 낮은 농도를 보였다. 하계에 높은 것은 강우에 의한 유입부하의 증가 및 저질에서의 용출부하에 의한 것으로 판단된다. 지점별로는 하구 쪽이 높고 외해로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 하구 안쪽은 거의가 해역수질환경기준 III등급을 초과하는 수질을 보였다.

3.2. 해수유동 시물레이션

생태계 모의를 위한 기본입력자료인 해역의 유동장을 계산하기 위하여, 먼저 3차원 해수유동모델을 이용하여 대상해역의 유동특성을 모의하였다. 총 계산시간은 해의 안정성을 고려하여 수치가 안정되는 40조석 주기를 택하였으며, 마지막 1조석에 대하여 20분 간격으로 조석류를 저장하였다. 또한 마지막 1조석에서 잔차류를 계산하여 생태계 모델의 입력자료로 이용하였다. 군산 연안 해역에서 모의된 잔차류의 계산결과는 Fig. 3에 나타내었다.

군산 연안 해역에서의 조석류 흐름을 보면, 창조류는 동북동~동남동류, 낙조류는 서남서~서북서류의 흐름방향을 가지며 반일주조류의 형태로서 1일 2회의 규칙적인 창·낙조류가 일어난다. 창조류시 해수유동 패턴은 외해 지역은 북류 또는 북동류의

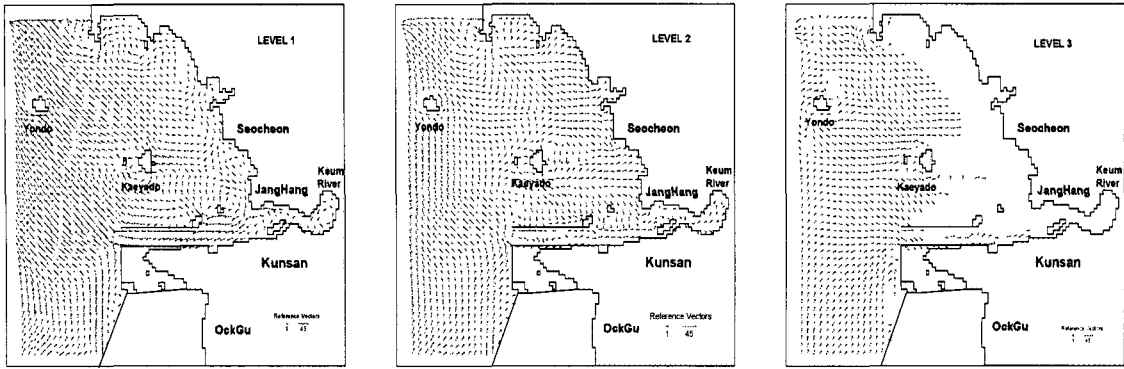


Fig. 3. Computed residual currents at 1st, 2nd, and 3rd level.

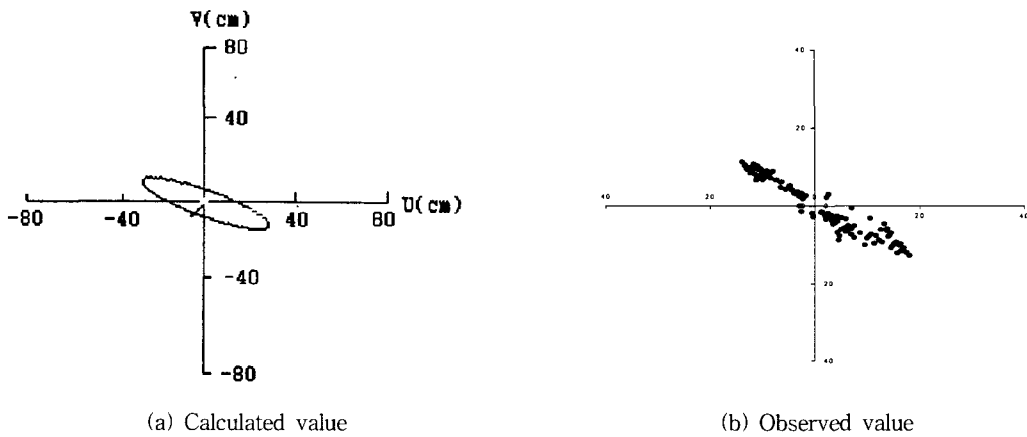


Fig. 4. Comparison of tidal current ellipses between computed and observed results.

흐름을 가지고, 군산 항로에서는 동류하여 내항으로 향하며, 북측도류제와 개야도 사이에서는 북동류하다가 개야 수로를 통해 동류 또는 남동류하여 군산 내항으로 향한다. 최강유속은 군산 항로에서 100~110cm/sec로 나타났다. 낙조류시 해수유동 패턴을 보면, 창조류와 반대의 유동 패턴을 보였다. 그리고 층간 흐름 패턴 역시 창조류와는 반대의 현상을 나타내는 것을 알 수 있었다. 낙조류의 최강 유속은 군산 항로에서 110~120cm/sec로 창조류보다 높게 나타났다.

해역에서의 오염물질 이동에 중요한 역할을 하는 잔차류 패턴을 보면, 1층에서는 담수유출에 따라 외해로 향하는 잔차류가 나타나고, 3층에서는 반대로 하구 내측 향하는 잔차성분이 나타났다. 이러한 결과로 인해 지층에 침강한 오염물질은 외해로 유출되지 못하고 점차적으로 하구 내만에 축적될 수 있다는 것을 간접적으로 평가할 수 있다.

해수유동 시뮬레이션의 타당성을 검토하기 위해

농업기반공사¹⁴⁾에서 실시한 조류관측지점(★)에서 실측된 조류타원도를 모델에서 시뮬레이션 된 계산치의 조류타원도와 비교 검토하였다.(Fig. 4). 예측된 조류타원도는 북서류로 나타나 실측치에서 조사된 조류 흐름방향과 유사하게 나타났고, 유속에서 조금 차이를 나타내었으나 거의 유사한 패턴을 보여주고 있어 본 결과가 대상해역의 흐름을 상대적으로 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3.3. 생태계 시뮬레이션

3.3.1. 수질 재현 및 모델의 보정

제시한 초기조건과 경계조건 및 오염부하량을 모델에 입력하고 시뮬레이션을 실행하여 계산된 식물플랑크톤, 용존무기인, 용존무기질소, COD의 농도 분포 특성을 살펴보면, 금강 하구둑의 방류량의 영향을 받는 금강하구둑 입구지점이 높고 외해역으로 갈수록 감소하는 분포를 나타내었다.

생태계모델로 계산된 결과가 대상해역의 수질을 잘 재현하고 있는지를 검증하기 위하여 국립수산물

학원⁸⁾에서 관측한 10개 지점에서의 식물플랑크톤, 용존무기인, 용존무기질소, COD의 실측치와 계산치의 정확도와 변동의 유사성을 평가하기 위하여 상대오차 및 상관계수를 조사하여 Table 6에 나타내었다.

식물플랑크톤의 실측치에 대한 계산치의 상대오차는 0.07~36.4%(평균 21.0%)이고, 상관계수는 0.93이었다. 금강하구와 외해역 일부지역에서의 상대오

차가 30%이상으로 높게 나타났으나, 해역의 평균 상대오차는 전체적으로 양호하였다. 용존무기인의 실측치에 대한 계산치의 상대오차는 11.37~36.3%(평균 24.3%)이고, 상관계수는 0.82이었다. 외해역의 일부지역에서 상대오차가 30%이상으로 높게 나타났고, 상관성이 다소 낮게 나타났다. 용존무기질소의 실측치에 대한 계산치의 상대오차는 -7.1~54.54%(평균 32.4%)이고, 상관계수는 0.99이었다. 상대오차

Table 6. The comparison of computed values with the observed Phytoplankton, DIN, DIP, COD in the Study area

St.	Phytoplankton(mgC/m ³)			DIP($\mu\text{g-at}/\ell$)		
	Obs.	Cal.	RE(%)	Obs.	Cal.	RE(%)
1	51.38	48.21	6.170	1.097	1.469	-33.911
2	23.85	18.52	22.348	0.968	0.756	21.901
3	30.600	25.742	15.876	0.766	0.654	14.621
4	35.030	21.908	37.459	0.669	0.557	16.741
5	22.800	22.816	-0.070	0.694	0.468	32.565
6	27.150	17.257	36.438	0.694	0.557	19.741
7	31.430	27.198	13.465	0.935	0.754	19.358
8	27.380	23.086	15.683	0.685	0.436	36.350
9	21.680	14.265	34.202	0.927	0.593	36.030
10	22.350	15.890	28.904	0.774	0.686	11.370
mean	29.365	23.486	21.061	0.821	0.693	24.259

St.	DIN($\mu\text{g-at}/\ell$)			COD(mg/ ℓ)		
	Obs.	Cal.	RE(%)	Obs.	Cal.	RE(%)
1	32.304	41.307	-27.870	2.500	3.102	-24.080
2	17.649	22.324	-26.489	2.130	2.652	-24.507
3	14.012	18.978	-35.441	1.690	1.861	10.118
4	10.262	12.747	-24.216	1.460	1.343	8.014
5	5.661	8.750	-54.566	1.390	1.109	20.216
6	3.887	4.163	-7.101	1.520	0.806	46.974
7	4.685	3.560	24.013	2.210	1.659	24.932
8	4.893	3.098	36.685	1.630	1.225	24.847
9	4.631	2.646	42.863	1.320	0.946	28.333
10	3.905	2.162	44.635	1.240	0.914	26.290
mean	10.189	11.974	32.388	1.709	1.562	23.831

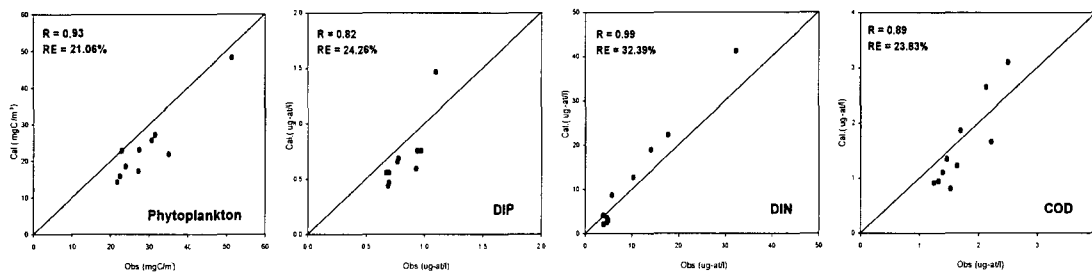


Fig. 5. Comparisons between predicted and observed water quality.

는 외해역 지역과 금강 하구에서 40%이고 평균 32%로 다소 높게 나타났다. 그러나 변동의 유사성을 나타내는 상관계수는 아주 높게 나타나 전체적인 변화패턴은 잘 재현하는 것으로 평가되었다. COD의 실측치에 대한 계산치의 상대오차는 8.0~46.9%(평균 23.8%)이었고, 상관계수는 0.89이었다. 외해역 입구부에서 상대오차가 다소 높았으나 전체적으로 유사한 경향을 나타내었다.

하구의 특성상 담수의 유출입, 바람의 영향 및 인근 오염원의 영향에 따른 환경적 변화가 큰 해역으로 수질 재현이 상당히 어려운 특징을 가지고 있다. 본 연구에서 전체적으로 정확도를 나타내는 상대오차가 30% 정도이고, 변동의 유사성을 나타내는 상관계수가 0.8 이상을 나타내어 어느 정도 해역의 특성을 재현한다고 판단되었다.

3.4. 수질관리대책의 정량적 평가

부영양화의 진행속도는 해역에서의 영양염 교환 정도, 해역의 지형 및 물리학적 특성 등과 같은 환경적 인자와, 해역으로 유입되는 오염부하의 크기에 영향을 받는다. 오염부하는 크게 육상기원의 부하원이 있고, 해역내 퇴적물에 기인한 부하원이 있으며, 대기를 통한 부하도 존재한다. 또한 해역내 양식장

이 존재할 경우 양식생물에 의한 부하도 상당부분을 차지한다. 이들 요인 중에서 부영양화의 진행속도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 육상으로부터 배출되는 영양염부하이며, 전체오염부하의 대부분을 차지하고 있다. 일부 저질 오염이 심한 곳에서는 퇴적물에 기인한 오염도 중요한 역할을 하기도 한다. 따라서 근원적으로 부영양화 현상을 방지하고 제어하기 위해서는 육상을 통한 오염부하에 대한 정확한 평가가 필요하며 이를 통하여 관리대책을 수립하여야 한다.

대상해역의 부영양화를 적절하게 제어하고 저감하는 기술을 개발하기 위해서는 부영양화를 유발하는 물질의 유입 및 이동하는 양에 대한 정밀한 평가가 있어야 한다. 즉, 수질예측모델을 이용하여 대상해역에서 적절한 관리대책의 효과를 정량적으로 평가하고 적용할 필요가 있다.

군산 연안해역에서 부영양화의 발생을 제어하고 효율적으로 해역을 관리하기 위하여, 이미 보정된 3차원 생태계 모델을 이용하여 오염부하원인 하천을 통한 질소 및 인의 부하가 해역의 수질에 미치는 영향을 정량적으로 검토하였다. 정량적 평가를 위하여 하천을 통한 질소와 인 부하량을 현재 오염부하를 기준으로 하여 오염부하량을 20%, 40%, 60%, 80%로 각각 감소시켰을 때, 해역에서의 영양염 농도의 변화를 계산하고 변동량을 Fig.6에 나타내었다.

하천의 부하량을 20% 저감시켰을 때 해역 중의 영양염 농도는 질소가 2%~20%의 제거효과를 보였으나 인의 제거 효과를 기대할 수 없었다. 하천 부하량을 80% 저감시켰을 때 해역 중의 영양염 농도는 질소가 10%~80%, 인의 경우 0%~10% 제거되는 것으로 나타나, 질소의 제거효과가 크게 나타나는 것으로 나타났다.

지점별로 질소는 하천 유입지점에서부터 외해역으로 유입되는 지점 St. 1~St. 5에서 큰 제거효과를 나타내었고, 지점 St.6~St.10에서는 외해역으로 갈수록 그 효과가 미비하였다. 인의 경우에는 하천 유입지점인 St.1에서 10% 이하의 제거효과를 나타내었고, 그 외 지점에서는 2% 이하의 낮은 제거효과를 나타내었다.

4. 결 론

군산 연안 해역의 부영양화를 제어하기 위한 수질관리방안을 수립하기 위해 해수유동모델과 생태계모델을 이용하여, 영양염의 연평균 농도분포를 재현하고, 부영양화의 제어대책으로 하천유입부하 감소와 금강 하구둑 방류량 조절에 따른 영양염의 농도를 정량적으로 평가한 결과는 다음과 같다.

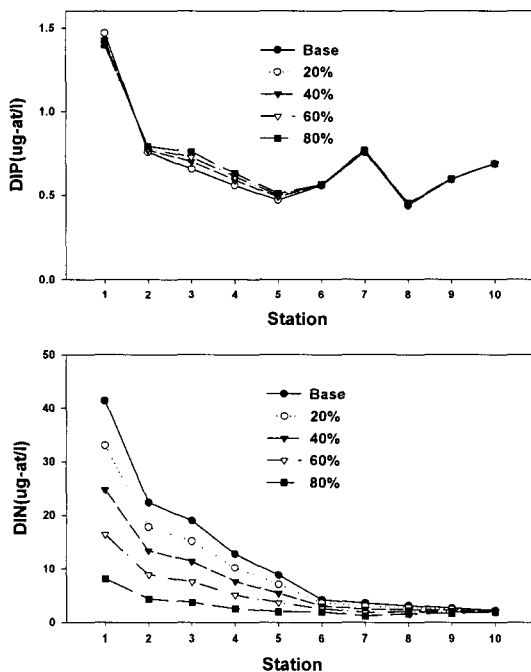


Fig. 6. The predictions of DIP and DIN depending on various nutrient loads reduction from Keum River estuary under the present condition.

- 1) 해수유동 모델에서 계산된 군산 연안 해역의 해수유동 특성을 보면, 군산 연안 해역에서 계산된 조석류는 기존에 조사된 조류 흐름방향과 유사하게 나타났고, 유속에서 조금 차이를 나타내었으나 거의 유사한 패턴을 보였다.
- 2) 잔차류 성분은 저층으로 향할수록 밀도성분의 약화로 잔차류가 하구쪽으로 향하면서, 오염물질이 외해로 유출되지 못하고, 점차적으로 하구 내만에 축적되는 것으로 보였다.
- 3) 생태계모델을 이용하여 식물플랑크톤, 용존무기인, 용존무기질소, COD 농도를 실측치와 계산치를 비교한 결과 상관계수가 용존인이 0.82를 제외한 나머지 값들은 0.9이상이었다고, 실측치와 계산치의 일치성을 나타내는 상대오차 평균은 용존무기질소가 32%로 다소 높았으나 그 외 값들은 평균30% 이내로 나타났다.
- 4) 군산 연안 해역의 부영양화 현상을 제어하기 위하여 하천을 통하여 유입되는 영양염의 부하량을 20%, 40%, 60%, 80% 단계적으로 저감시켰을 때, 영양염의 농도는 질소가 2%~80%, 인의 경우 10%이하의 제거효과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 군산대학교 수산과학연구소 연구비지원에 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 이상호, 최현용, 오임상, 하계 금강 plume의 구조와 변동, 한국해양학회지, 30(2), 125-137.
- 2) 일본수산자원보호협회, 1973, 수산환경수질기준, 11-13pp.
- 3) 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 10-14pp.
- 4) 최우정, 1993, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 1-7pp.
- 5) 김광수, 1995, 생태계모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 9-12pp.
- 6) 조은일, 1996, 생태계모델을 이용한 어장환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 11-13pp.
- 7) 김동명, 1997, 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문,

- 9-13pp.
- 8) http://www.nfrda.re.kr/sitemap/technic/environment_1.htm
- 9) Shin M. S. and T. Yanagi, 1999, Mitigation for the anti-function of development in caused by Saemangeum reclamation, Proceeding of Korean Soc. Civil Eng., 19(II -3), 317-327.
- 10) Choi, B. H., 1984a, A three-dimensional model of the eastern China Sea. In: Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Seas, Elsevier Oceanography Series, T. Ichiye, editor, Elsevier, New York, 209-224pp.
- 11) Choi, B. H, 1984, Observed and Computed Tidal Current in the East China Sea, J. Oceanol. Soc. Kor., 20(1), 56-73.
- 12) 농림수산부, 전라북도, 1994, 새만금 종합개발사업 어업피해보상조사연구, 114-116pp.
- 13) 中田喜三郎·石川公敏·松川康夫, 1985, 内灣の流動場の數値實驗, 沿岸海洋ノート, 27(2), 96-108.
- 14) 농어촌진흥공사, 2000, 금강하구둑 사업소 자료 (요청자료).
- 15) 환경부, 1997, 황해 오염감시 및 개선기술, 135-160pp.
- 16) Eppley, R. W, 1972, Temperature and phytoplankton growth in the sea, Fish, Bull., 70, 1063-1082.
- 17) Thomann, R. V., D. M. Di Toro, R. P. Winfield and D. J. O'Connor, 1975, Mathematical modeling of phytoplankton in lake Ontario, Part I, Model development and verification, Manhattan college, Bronx, New York, For US-EPA, Corvallis, Oregon, EPA-600/3-75-005.
- 18) Goldman, J. C. and E.J. Carpenter, 1974, A kinetic approach to effects of temperature on algal growth, Limnology and Oceanography, 19(5), 756-766pp.
- 19) Scavia, D. and B. J. Eadie, 1976, The use of measurable coefficients in process formulations - zooplankton grazig. Ecol. Mod. 2(4), 315-319.
- 20) Jørgensen, S. E, 1979, Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters, International Society for Ecological Modeling, 70pp.