

군산하구 해역에서의 부영양화 모델링

김종구, 정태주, 강훈, 김준우, 이남도

Eutrophication Modelling in Gunsan Estuary

〈 目 次 〉

Abstract

1. 서론

2. 재료 및 방법

3. 결과 및 고찰

4. 결과

참고문헌

Abstract

Gunsan coastal area is one of region increasing pollution problems. One of the most important factors that cause eutrophication is nutrient materials containing nitrogen and phosphorus which stem from excretion of terrestrial sources. At this study, the three-dimensional numerical hydrodynamic and ecosystem model, which was developed by Institute for Resources and Environment of Japan, were applied to analyze the processes affecting the eutrophication.

The residual currents, which were obtained by integrating the simulated tidal currents over 1 tidal cycle, showed the presence of a typical. Density driven currents were generated westward at surface and eastward at the bottom in Geum estuary area where the fresh waters are flowing into.

The ecosystem model was calibrated with the data surveyed in the field of the study area in annual average. 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 were performed using ecosystem model under the conditions of 20~80% pollution load reductions from pollution sources. In study area, concentration of DIN and DIP were reduced to 20~80% and under 10% in case of the 80% reduction of the input loads from fresh water respectively. But pollution loads from sediment had hardly affected DIN and DIP concentration.

For the environment management of coastal areas, in case of Gunsan area, the most important pollution sources affecting eutrophication phenomenon were found to be the input loads from fresh water.

1. 서론

본 연구 대상인 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 있다.

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 특징이 외부환경이 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 물질이 분포하는 모양이 불규칙하다.

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 발전되었다. 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 한다.

본 연구에서는 부영양화 현상과 이로 인한 환경악화 현상과 관련된 중요과정을 정량적으로 파악하기 위하여 군산 연안 해역을 대상으로 3차원 해수유동 모델(COSMOS)을 이용하여 3차원 해수유동을 재현한 후, 생태계모델(EUTRO)을 이용하여 식물 플랑크톤 및 영양염의 농도분포를 재현하였다. 그 후에 금강에서의 오염부하가 해역의 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.

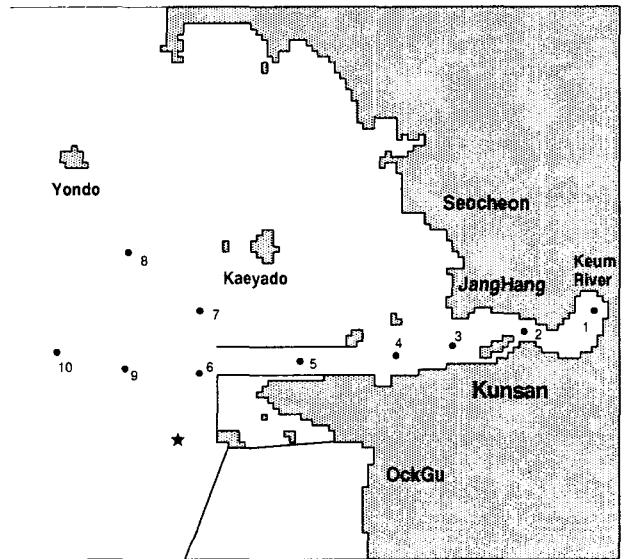


Fig. 2.1. The map of study area.

2.2 해역의 수질 평가 자료

2.2.1 해역의 수질 특성

군산 연안 해역의 수질 특성을 알아보기 위하여 국립수산진흥원에서 조사한 한국해양환경 조사자료 중 Fig. 2.1에 도시한 지점 10개 지점의 수질자료를 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 서천군 비인항까지, 동서로는 금강 하구에서 연도까지를 대상해역으로 하였다.

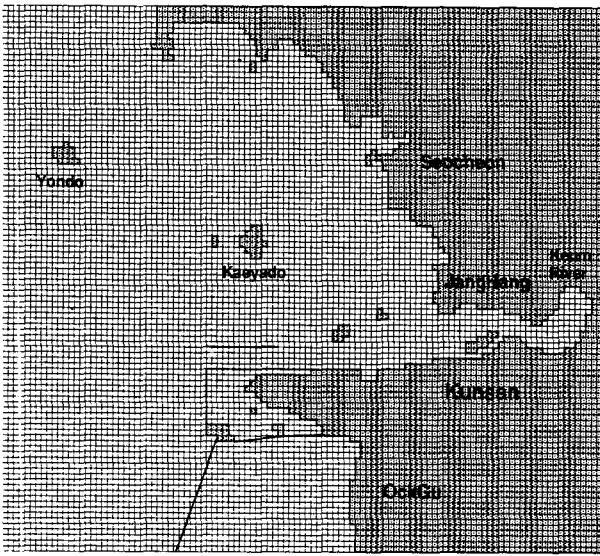


Fig. 2.2. Finite-difference grid of the three-dimensional model.

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. 2.2).

해수유동모델의 입력자료는 Table 2.1에 제시하였다. 수온과 염분의 계산영역 내 초기값과 외해의 경계

값은 실측자료를 이용하여 각 층별로 일정한 값을 주었다. 각 층에서 수온은 20℃, 염분은 18‰를 적용하였다.

수심자료는 국립해양조사원 측량한 자료를 사용하였다. Coriolis parameter는 신과 유(1999)가 새만금 외해역을 대상으로 적용한 $f = 8.55 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ 을 적용하였다. 해저마찰계수는 Tang et al.(1990), 최(1984a; 1984 b), 김(1995)과 김(1999)이 황해와 동중국해를 대상으로 $k = 0.0025$ 를 적용하였고, 신과 유(1999)는 황해와 새만금 유역을 대상으로 $k = 0.026$ 을 적용하였다. 수평확산계수는, 농림수산부(1994)에서 실측한 자료가 $6.06 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 이며, 신과 유(1999)는 $5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 값을 사용하였으나, 본 모델에서는 $4 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 를 적용하였다. 연직확산계수의 경우 $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 및 $10 \text{ cm}^2/\text{s}$ 는 완전혼합 조건을 나타내고, $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 는 완만한 혼합조건을 나타낸다고 中田(1991)은 보고하였다. 본 해역은 담수가 유입되는 하구조건으로 혼합이 원활하게 이루어지는 것으로 가정하여 $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 값을 적용하였다. 하천을 통한 담수유입은 금강을 통하여 유입하며 하구로의 유입량은 농진공(2000)에서 실측한 방류량 자료를 적용하였다. 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙해서 없는 것으로 가정하였다.

3차원 해수유동모델에서 계산된 조석류가 정상상

<Table 2.1 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	$4.0E4 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
Diffusion coefficient	$4.0E4 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
Wind speed	none
Calculation time	40 tidal cycle

태에 도달한 후 마지막 한 조석을 평균해서 잔차류를 계산하였다. 그리고 조석류가 재현한 유동특성이 해역의 유동을 잘 재현하는지 평가하기 위하여 Fig. 2.1에 나타낸 관측지점(★)에서 실측된 유향과 유속을 모의한 조류타원도와 비교하여 유동모델을 검증하였다.

2.3.2 생태계모델 입력자료

생태계모델의 모델영역은 해수유동모델에 사용된 격자망과 동일하게 구성하였다. 각 층별 수질인자의 초기농도와 경계농도는 대상해역의 실측치를 토대로 공간적인 분포를 고려하여 보간법으로 계산하여 입

력하였다(Table 2.2)

2.3.3 유입부하량 및 모델입력인자

1) 하천 유입부하

모델 영역내로 유입되는 육상부하원으로 금강하구둑의 유출수를 고려하였고, 모델의 구성요소에 대한 영양염의 부하 농도는 농어촌진흥공사(2000)에서 실측한 자료를 이용하였다. POC와 DOC는 환경부(2000)에서 실측한 자료를 이용하였다. 대기로부터의 유입부하 및 비점원 오염부하는 고려하지 않았다 (Table 2.3).

< Table 2.2 Input data for eutrophication model. >

Parameters		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 2.3 Flow and pollutant loads of rivers flowing into model. >

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

2) 생물학적 Parameter

생태계 모델에서 이용하는 생물학적 parameter는 관련 논문에서 인용된 자료 및 문헌조사를 통하여 산정하였다.

식물플랑크톤 성장속도의 온도 의존성을 지수함수로 표현한 대부분의 모델들은 20°C를 기준으로 하고 있으나, Eppley(1972)와 Thomann et al.(1975)은 0°C를 기준으로 하고 있다. Eppley(1972)는 다양한 종에 관한 많은 연구 결과로부터 0°C의 최대성장속도는 0.59/day이라 했는데, 20°C로 환산할 경우 2.09/day가 된다. 한편 Beca and Arnett(1976)는 20°C에서 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.(1975)은 0.02/day, Scavia and Eadie(1976)는 0.03/day, Jørgensen(1979)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 지점별, 계절별로 큰 변화가 있으며 외해역에서는 거의 용출일어나지 않으므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질특성

3.1.1 수질특성

군산 연안 해역의 수질특성을 알아보기 위하여 국립수산과학원(2000)에서 측정된 자료를 사용하여 10개 정점의 수질의 분석자료에 대한 월별 범위 및 평균값을 Table 3.1에 나타내었다.

용존산소(DO)는 수산생물, 특히 어패류의 산란과 성장에 있어 중요한 제한인자로 작용하고, 수괴의 이동이나 혼합과정을 파악하는 중요한 인자로서, DO변동은 식물성 플랑크톤의 증식과 사멸 및 수질 변화에 깊이 관여한다. DO의 연평균 농도범위는 4.55~15.32mg/l(평균 8.69mg/l)의 범위를 나타내었다. 계절별 평균 농도분포를 보면 동계에 높게 나

<Table 3.1 Range and mean values of water quality in the coastal area of Gunsan.>

Constituent (Unit)		Feb.	May.	Aug.	Nov.	Total
DO (mg/l)	Range	11.23 ~ 15.32	8.02 ~ 8.97	4.55 ~ 10.28	5.16 ~ 6.05	4.55 ~ 15.32
	Mean	13.24	8.38	7.64	5.49	8.69
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
TSS (mg/l)	Range	21.00 ~ 77.00	20.30 ~ 58.00	2.40 ~ 15.20	2.80 ~ 8.20	2.40 ~ 77.00
	Mean	45.76	35.52	7.90	5.76	23.74
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	3.74	0.13	0.31	0.52	0.43
TP (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

타나고, 하계에서 낮은 값을 나타내었다. 이는 수온의 증가로 인한 해수 중 용존산소의 포화농도 감소와, 유기물의 산화에 따른 DO 소비가 공급보다 높기 때문이다.

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.

총부유물질(TSS)은 육상기원의 유기·무기물의 유입이나 저층 퇴적물의 재부유에 의해 영향을 받는 인자로서, 태양광의 투과를 방해하여 식물플랑크톤의 광합성을 저해하고, 해조류 및 패류의 표면에 부착하여 성장에 영향을 주거나 폐사의 원인이 되기도 한다. 본 해역에서 TSS의 평균농도는 2.40~77.00mg/l (평균 23.74mg/l)의 범위로 일반적인 하구보다 높게 나타났다. 계절별로는 동계에 높고 하계에 낮아지는 변화 특성을 보였는데, 이는 최 등(1998)이 황해 남동해역을 대상으로 총부유물질의 농도와 상관성이 큰 투명도의 계절 변화 연구에서 겨울의 경우 해수면 냉각과 바람에 의한 상·하층 연직혼합으로 인하여 저층 퇴적물의 재부유가 활발하다는 내용과 일치하는 결과를 보였다.

해역에서 자생유기물질의 하나인 식물성플랑크톤은 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 0.43

mg/l)의 범위를 나타내었다. 지점별로는 금강수가 유입하는 하구 안쪽이 높고 외해로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

용존무기인(DIP)은 DIN과 함께 해양생물의 제한 인자로 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 해역수질 환경기준 III등급을 초과하는 수질을 보였다.

3.2 해수유동 시뮬레이션

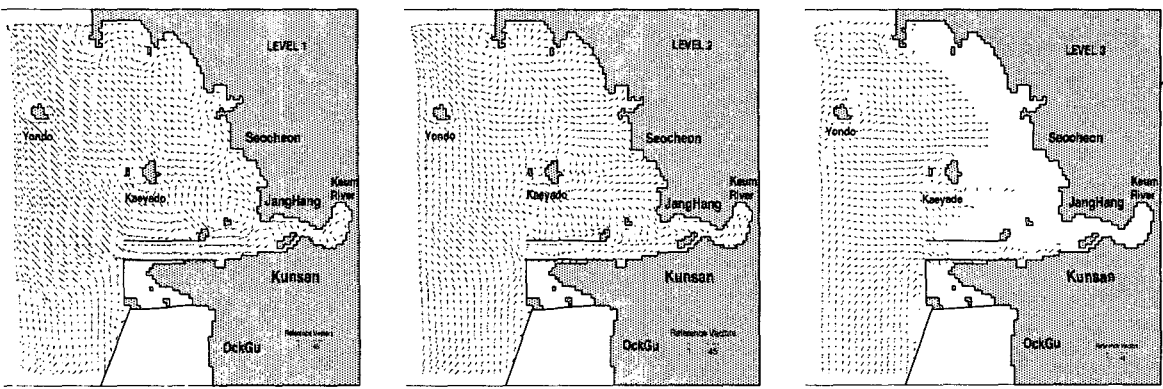
생태계 모의를 위한 기본입력자료인 해역의 유동장을 계산하기 위하여, 먼저 3차원 해수유동모델을 이용하여 대상해역의 유동특성을 모의하였다. 총 계산시간은 해의 안정성을 고려하여 수치가 안정되는 40조석 주기를 택하였으며, 마지막 1조석에 대하여 매 20분 간격으로 조석류를 저장하였다. 또한 마지막 1조석에서 잔차류를 계산하여 생태계 모델의 입력자료로 이용하였다. 군산 연안 해역에서 모의된 잔차류의 계산결과는 Fig. 3.1에 나타내었다.

군산 연안 해역에서의 조류패턴을 보면, 창조류는 동북동~동남동류, 낙조류는 서남서~서북서류의 흐름방향을 가지며 반일주조류의 형태로서 1일 2회의 규칙적인 창?낙조류가 일어난다.

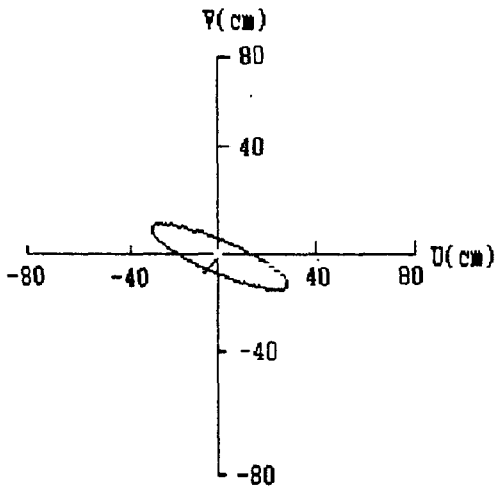
창조류시 해수유동 패턴은 외해 지역은 북류 또는 북동류의 흐름을 가지고, 군산 항로에서는 동류하여 내항으로 향하며, 북측도류제와 개야도 사이에서는 북동류하다가 개야 수로를 통해 동류 또는 남동류하여 군산 내항으로 향한다. 최강유속은 군산 항로에서 100~110cm/sec로 나타났다.

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.

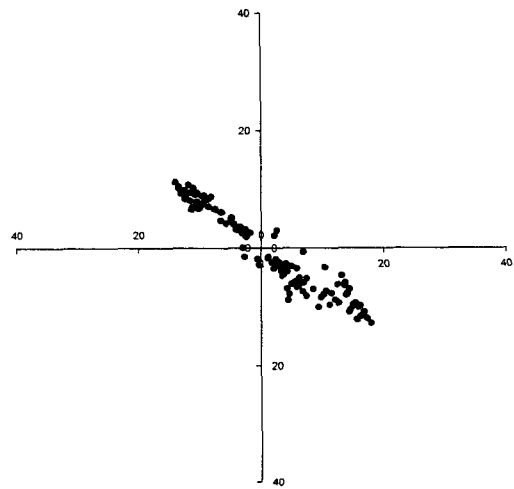
기본적으로 조석 현상에 의한 해수의 순이동은 없어야 한다. 한 주기동안을 시간 적분하면 그 값은 영이 되기 때문이다. 그러나 조석파가 해안선과 해저



< Fig. 3.1. Computed residual currents at 1st, 2nd, and 3rd level.>



(a) Calculated value



(b) Observed value

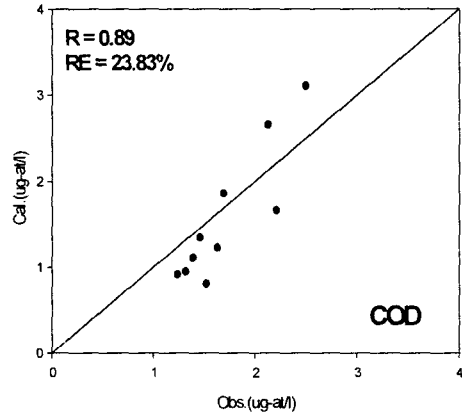
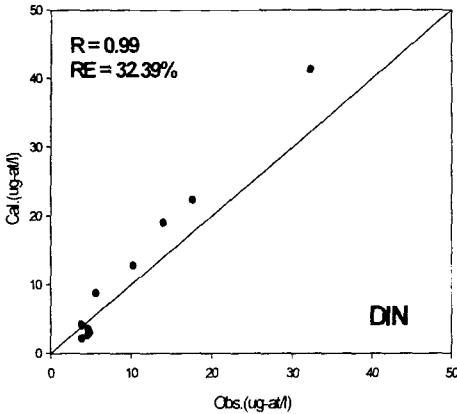
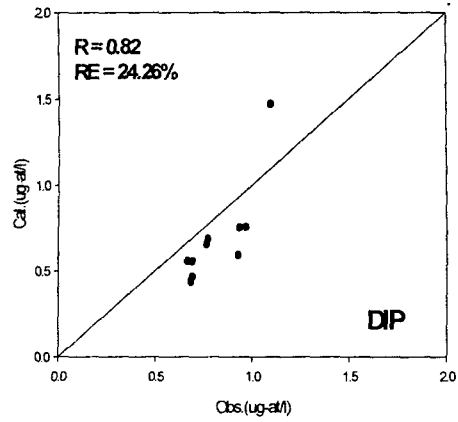
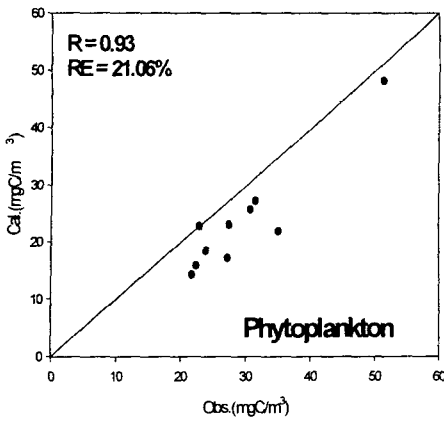
< Fig. 3.2 Comparison of tidal current ellipses between computed and observed results.>

지형이 복잡한 해역으로 진입하게 되면서 변형된 형태가 되게 되는데 조석 한주기 동안을 시간 적분하게 되면 잔류하는 흐름이 생기게 된다. 이는 조석 잔차류라는 흐름으로써 이 해역의 해수 유동에 의한 해수의 순이동에 영향을 주게된다. 따라서 조석의 수치모형을 이용하여 쉽게 계산되어질 수 있는 흐름이며, 이는 오염물 및 퇴적물 이동과 관련하여 중요한 부분이라 하겠다. 황해에 있어서의 조석 잔차류는 한반도와 중국 연안을 따라서 강하게 나타나고 있다. 특히 만이나 연안 근처에서는 강한 조석 잔차류가 형성되기도 한다.

군산 연안해역에서의 잔차류 패턴을 보면, 1층에서는 담수유출에 따른 밀도성분에 기인해 외해로 향하

는 잔차류가 나타나고, 3층에서는 그 성분이 약해지면서 반대로 하구 내측 향하는 잔차성분이 나타났다. 이러한 결과로 인해 저층에 침강한 오염물질은 외해로 유출되지 못하고 점차적으로 하구 내만에 축적될 수 있다는 것을 간접적으로 평가할 수 있다.

해수유동 시뮬레이션의 타당성을 검토하기 위해, Fig.2.1에 나타낸 농업진흥공사(1998)에서 실시한 조류관측지점(★)에서 실측치된 조류타원도를 모델에서 시뮬레이션 된 계산치의 조류타원도와 비교 검토하였다.(Fig. 3.2). 예측된 조류타원도는 북서류로 나타나 실측치에서 조사된 조류 흐름방향과 유사하게 나타났고, 유속에서 조금 차이를 나타내었으나 거의 유사한 패턴을 보여주고 있어 본 결과가 대상해역의



〈Fig. 3.3. Comparisons between predicted and observed water quality.〉

흐름을 상대적으로 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3.3 생태계 시뮬레이션

3.3.1 수질현황 재현 및 모델의 보정

식물플랑크톤, 용존무기인, 용존무기질소, COD의 분포 특성을 살펴보면, 금강 하구둑의 방류량의 영향을 받는 금강하구둑 입구지점이 높은 농도를 나타내었다.

생태계모델로 계산된 결과가 대상해역의 수질을 잘 재현하고 있는지를 검증하기 위하여 국립수산과학원(2000)에서 관측한 10개 지점에서의 식물플랑크톤, 용존무기인, 용존무기질소, COD의 실측치와 계산치에 대한 일치도를 보면, 식물플랑크톤의 경우, 실측값은 21.680~51.380mgC/m³(평균 29.365mgC/m³), 계산값은 14.265~28.210mgC/m³(평균 23.486mgC/m³)으로 나타났다. 금강하구와 외해역 일부지역에서 상대오차가 30%이상으로 높게 나타났으나, 해역의 평

균 상대오차는 21%로 전체적으로 양호하였다. 용존무기인의 경우, 실측값은 0.685~1.097μg-at/l(평균 0.821μg-at/l), 계산값은 0.557~1.469μg-at/l(평균 0.693μg-at/l)를 나타내었다. 외해역의 일부지역에서 상대오차가 30%이상으로 높게 나타났으나, 해역의 평균상대오차는 24%로 전체적으로 양호하였다. 용존무기질소의 경우, 실측값은 3.887~32.304μg-at/l(평균 10.189μg-at/l), 계산값은 2.162~41.307μg-at/l(평균 11.974μg-at/l)를 나타내었다. 상대오차는 외해역 지역과 금강 하구에서 40%이상의 값이 나타내는 등, 평균 32%로 다소 높게 나타났다. COD의 경우, 실측값은 1.240~2.500mg/l(평균 1.709mg/l), 계산값은 0.914~3.102mg/l(평균 1.562mg/l)를 나타내었다. 상대오차는 St. 6에서 40%이상 높게 나타났으나 평균상대오차는 24%로 전체적으로 양호하였다.

실측치에 대해 계산치가 적합한지를 판단하기 위하여 각 항목별로 단순회귀분석을 실시하여 계산치

와의 변동의 유사성을 검토하였다. 분석결과는 Fig. 3.3에 나타내었다.

단순회귀분석 결과 상관계수(correlation coefficient)는 식물성플랑크톤, 용존무기인, 용존무기질소, COD에 대하여 각각 0.93, 0.82, 0.99, 0.89으로 대체로 높은 상관성이 나타내어 농도의 패턴이 유사함을 알 수 있다.

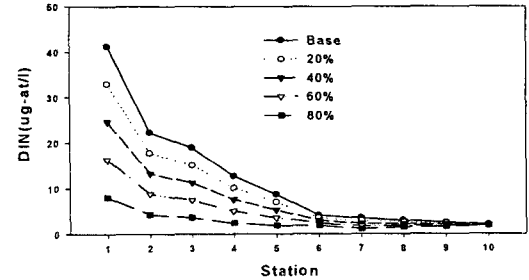
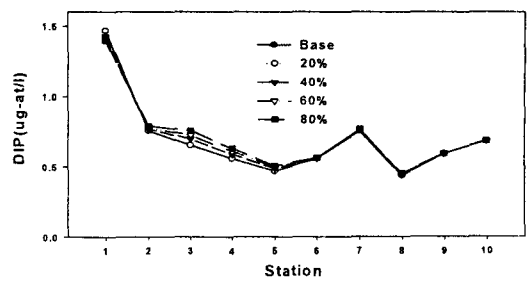
3.4 수질관리대책의 정량적 평가

부영양화의 진행속도는 해역에서의 영양염 교환정도, 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 양식장이 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. 4.18에 나타내었다.

하천의 부하량을 20% 저감시켰을 때 해역 중의 영양염 농도는 질소가 2%~20%의 제거효과를 보였으나 인의 제거 효과를 기대할 수 없었다. 하천 부



<Fig. 3.4. The predictions of DIP and DIN depending on various nutrient loads reduction from Keum River estuary under the present condition..>

하량을 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 제거 효과를 나타내었고, 지점 St. 6~St. 10에서는 외해역으로 갈수록 그 효과가 미비하였다. 인의 경우에는 하천 유입지점인 St. 1에서 10% 이하의 제거효과를 나타내었고, 그 외 지역에서는 2% 이하의 낮은 제거효과를 나타내었다.

4. 결 론

군산 연안 해역의 부영양화를 제어하기 위한 수질 관리방안을 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.

1. 해수유동 모델에서 계산된 군산 연안 해역의 해수유동 특성을 보면, 군산 연안 해역에서 계산

- 된 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.

◆ 참고 문헌 ◆

- ▶ 김중구, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 박사학위논문, 1994.
- ▶ 김광수, 생태계모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 1995.
- ▶ 김동명, 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 1999.
- ▶ 조은일, 생태계모델을 이용한 어장환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사 학위논문, 1996.
- ▶ 최용규 · 권정노, 황해 남동해역 투명도의 계절 변화, 한국수산학회지, 제3권, 31호, 1998.
- ▶ 최우정, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 1993.
- ▶ 농림부 · 농어촌진흥공사, 수리실험 및 파랑관측 보고서, 2000
- ▶ 환경부, 황해 오염감시 및 개선기술, 1997.
- ▶ 日本水産資源保護協會編, 水産環境水質基準, 1973, p.11~13.

- ▶ 中田喜三郎 · 石川公敏?松川康夫, 内灣の流動場の數値實驗, 沿岸海洋ノ・ト, 27(2), 1985, p.96~108.
- ▶ Choi, B. H, A three-dimensional model of the East China Sea, Ocean Hydrodynamic of the Japan and East China Seas, Elsevier Oceanography Series, 39, 1984a, p.209~224.
- ▶ Choi, B. H, Observed and Computed Tidal Current in the East China Sea, J. Oceanol. Soc. Kor., 20(1), 1984b, p.56~73.
- ▶ Conover, R. J., Factors affecting the assimilation of organic matter by zooplankton and question of superfluous feeding. Limnol. Oceanogr., 11, 1966, p.346~354
- ▶ Jørgensen, S. E, Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters, International Society for Ecological Modeling, 1979.
- ▶ Ikushima, I. Ecological studies on the productivity of aquatic plant communities III, Effect of depth on daily photosynthesis in submerged macrophytes, Bot. Mag, Tokyo, 80, 1967, p.57~67.
- ▶ Okaich T. K., The cause of red-tide in neritic waters, Japan Fisheries res. convers Ass., 1985
- ▶ photosynthesis in subtropical Hawaiian waters, Mar, Biol., 1983, p.203~211.
- ▶ Tang, Y, Numerical modeling of the tide-induced residual current in the East China Sea, Collected papers on Kuroshio Investigation Study (I), Beijing China Ocean Press, (in Chinese, English abstract), 1990, p.33~43.