

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(III) - 오염부하의 정량적 관리 -

조 은 일 · 강 기 봉
제주대학교 환경공학과
(2003년 2월 14일 접수; 2003년 3월 22일 채택)

Water quality management of Jeju Harbor using material cycle model(III)

- Quantitative Management of Pollutant Loadings -

Eun-Il Cho and Ki-Bong Kang

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
(Manuscript received 14 February, 2003; accepted 22 March, 2003)

In this study, the material cycle model was applied to suggest alternative management of water quality for Jeju Harbor. The distribution of COD, DIN (dissolved inorganic nitrogen) and DIP (dissolved inorganic phosphorus) concentrations was reasonably reproduced by simulations on the model area of the Jeju Harbor using a material cycle model.

The simulations of COD, DIN and DIP concentrations were performed under the conditions of 20~100% pollution loadings reductions from pollution sources. In case of the 100% reduction of the input loads from Sanzi river, concentrations of COD, DIN and DIP were reduced to 39%, 78% and 52%, respectively at Jeju harbor. In contrast, in case of the pollutant loadings reductions from sediment, the effect of DIN and DIP reduction relatively seemed to increase around the center of study area. The 95% reduction of the pollutant loadings from river and sediment is required to meet the COD and nutrients concentration of second grade of ocean water quality criteria.

Key words : Material cycle model, Pollutant loadings, COD, DIN, DIP, Seawater quality criteria

1. 서 론

제주항과 주변 연안 해역의 우수한 자연조건과 풍부한 자원을 지속적으로 이용하기 위해서는 자정 능력에 근거한 합리적인 해양환경관리가 필요하고, 해역의 수질을 정량적으로 관리하기 위해서는 수질 조사 자료에 근거한 수질 시뮬레이션을 통하여 장래의 수질을 예측할 수 있으며 대상해역의 환경용량을 파악함으로써 해역의 자정능력에 적합한 수질 관리 방안을 도출할 수 있다.¹⁾

연안해역의 수질시뮬레이션을 위해서는 그 해역

에서 일어나는 이류와 확산현상을 포함하는 물리적인 유동장을 파악하고 생태계 구성요소의 흐름을 수식화하여 수질을 예측하는 부영양화모델 및 3차원 수치모델이 유용한 도구로 이용되고 있다.^{2,3)} 일반적으로 해양의 수질예측에 많이 사용되는 부영양화모델의 하나인 물질순환모델은 생물체와 무생물체를 일괄하여 무기물질과 유기물질로 나누고 이들 상호간의 물질흐름을 취급하여 영양염류와 COD의 거동을 파악할 수 있으며, 모델구성은 해수의 유동 특성을 시뮬레이션할 수 있는 해수유동모델과 비보존성 물질에 대한 수질을 시뮬레이션하기 위한 생태계모델로 구성되어 있다.¹⁾

해역의 수질 예측에 관련된 국내의 연구를 살펴보면, 최⁴⁾가 3차원 물질 순환모델을 이용하여 진해만에서의 빈산소 수괴예측에 관하여 연구한 바 있

Corresponding Author : Eun-Il Cho, Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone : +82-64-754-3447
E-mail : eunilcho@cheju.ac.kr

고, 김⁵⁾이 생태계모형을 이용하여 영양염류 부하량에 따른 식물플랑크톤 농도를 예측하고 부영양화억제를 위한 방안을 제시한 바 있으며, 조⁶⁾는 생태계 모형을 이용하여 가막만의 어장환경용량을 산정하였다. 최근에 새만금 사업지구의 연안해역 수질관리를 위하여 오염부하가 해역의 수질관리에 미치는 영향을 김 등⁷⁾이 정량적으로 평가하였다.

제주항과 그 주변해역에 관한 연구를 살펴보면, 양 등⁸⁾이 산지천을 포함한 제주항 부근의 해양수리학적 특성을 평가하였으며 김 등⁹⁾은 제주도 북부연안해역의 해황과 조석전선 특성과 제주해협의 해수유동특성에 관하여 연구하였고, 조 등¹⁰⁾은 제주도 항만의 수질특성에 대한 조사 및 하천오염부하량 산정에 관한 연구를 진행하였으며 생태계모형을 이용하여 김 등¹¹⁾이 제주 남부연안해역에서 오염부하량 증가에 의한 환경용량 산정에 적용하였다. 그러나 제주도내의 항만에 대한 환경용량을 통한 정량적인 수질관리에 관한 연구는 전무한 실정이며 물질순환모형을 이용한 사례도 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 제주도내 주요 항만인 제주항을 대상으로 오염부하의 정량적인 관리를 위하여 해수유동특성을 파악하기 위한 3차원 해수유동모델과 비보존성 물질에 대한 분포를 시뮬레이션하기 위한 생태계모델로 구성된 물질순환모형을 적용하였다. 그리고 시뮬레이션된 결과를 통해 본 모델의 제주항 적용 가능성을 검토한 후, 제주항 내 수질오염을 유발할 수 있는 외부부하인 하천오염부하와 내부부하인 저질용출부하를 이용하여 제주항 수질개선을 위한 저감량을 정량적으로 산정하는 것이 본 연구의 목적이며 연구결과는 제주항의 해역수질관리를 위한 정량적인 기초자료로 제공될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역 및 자료 도출

수질 조사 자료는 제주항 내 5개 정점에서 총별로 조사된 전보 자료¹²⁾를 이용하였으며, 이들 자료를 바탕으로 수질시뮬레이션에 입력한 경계자료 및 초기 농도를 구하였고 모델 예측결과와 비교 분석하였다.

모델영역내인 제주항으로 유입되는 산지천의 오염부하량은 전보에 제시하였으며, 오염부하량은 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월에 계절별로 총 4회에 걸쳐 산지천 하류에서 수질조사한 값과 유량을 평균하여 각 항목별 입력자료로 적용하였다.¹²⁾

2.2. 물질순환모델의 구성

본 연구에 적용한 물질순환모델은 해수유동 시뮬

레이션을 위한 다층모델(Hydrodynamic model : COSMOS)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계 모델(Ecosystem model : EUTROP2)로 구성되어 있다. 물질순환모델을 시뮬레이션하기 위해서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 우선 해수유동현상을 파악하여야 하고 계산된 해수 유동 결과를 생태계 모델에 입력하고 시뮬레이션하여 수질을 예측할 수 있다.

2.2.1. 해수유동 모델

제주항의 해수유동을 시뮬레이션하기 위한 모델영역은 산지천 유출수가 해역에 미치는 영향을 고려하여 설정하였다. 격자는 X방향으로 75개, Y방향으로 89개 그리고 Z방향으로는 3층으로 격자망을 구성하고 하나의 격자 크기는 X, Y방향으로 각각 25m로 하였다.

모델영역내의 해수유동을 시뮬레이션하기 위한 입력자료는 전보¹³⁾와 같으며 경계에서의 조위는 반일주조성분인 M₂분조를 평균 조석으로 이용하였고, 육상의 하천을 통하여 모델영역 내로 유입되는 담수 유입원은 산지천을 고려하여 조사시기에 관측한 유량, 수온, 염소량 등의 연평균자료를 입력하였다. 총 계산시간은 20조석까지 계산하여 해수유동을 시뮬레이션하였고 계산된 해수유동의 결과가 실제 관측치와 어느 정도 일치하는지를 알아보기 위해서 기존 관측점에서의 실측된 유량과 유속을 계산치와 비교하여 유동모델을 검증하였다. 그리고 조석류에 의한 조석 잔차류, 담수유입에 의한 밀도류가 합성되어 나타나는 잔차류를 시뮬레이션하였다. 바람에 의한 취송류는 제외하였고 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 조석을 조석주기로 평균한 항류를 잔차류로 하여 시뮬레이션하였다.

2.2.2. 생태계 모델

생태계 모델의 모델영역은 해수유동모델에 사용된 격자망과 동일하게 적용하였고 해수유동모델의 계산결과 중에서 잔차류를 생태계모델의 시뮬레이션에 이용하였으며 모델의 구성요소들에 대한 값들은 Table 1에 나타내었다.

2.2.2.1. 초기치 및 경계치

생태계모델의 시뮬레이션을 위한 모델의 구성요소들에 대한 각 수질항목 중 DO, COD, DIP, DIN, POC, DOC 그리고 식물플랑크톤의 초기치는 실측 자료를 이용하여 산정하였고, 동물플랑크톤의 초기치 및 경계치는 문헌 조사된 값을 이용하여 각각 수심별로 구분하여 입력하였다.

연직확산 계수의 경우, 1 cm²/sec ~ 10 cm²/sec는 완전혼합조건을 나타내고 0.1 cm²/sec는 경미한 혼합조건을 나타낸다고 보고되고 있으며 본 연구에서는

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(III) : 오염부하의 정량적 관리

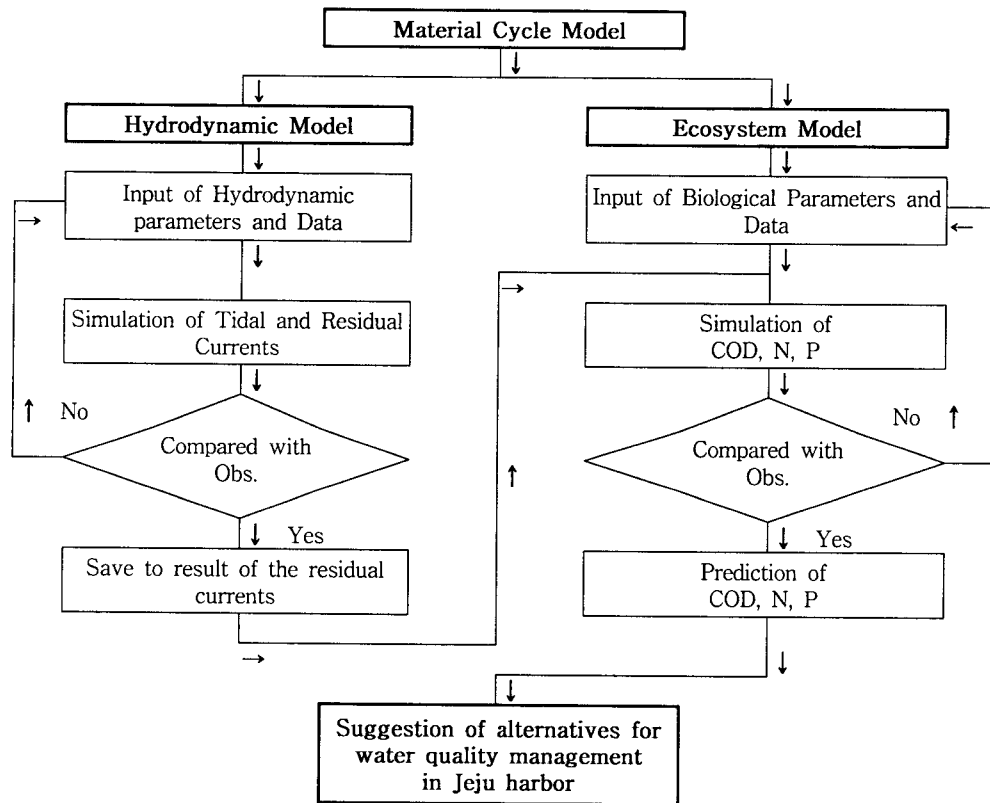


Fig. 1. The schematic diagram of material cycle model.

Table 1. Input data for ecosystem model

Parameter	Input values							
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 25m$							
Water depth	chart datum + MSL							
Time interval	300 sec							
Initial condition for compartments								
level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
	(mg/L)		(mmole/m ³)			(mg-C/m ³)		
1	8.20	2.20	0.68	10.0	400	1800	40	5
2	8.20	2.00	0.68	8.00	350	1600	20	5
3	8.20	2.00	0.68	6.00	350	1400	20	5
Boundary condition for compartments								
level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
	(mg/L)		(mmole/m ³)			(mg-C/m ³)		
1	8.30	1.50	0.40	5.00	350	1600	40	5
2	8.30	1.50	0.40	5.00	300	1200	20	5
3	8.20	1.50	0.45	4.50	300	1200	20	5
Horizontal viscosity coefficient	1.0 E5(cm ² /s)							
Horizontal diffusion coefficient	1.0 E5(cm ² /s)							
Vertical diffusion coefficient	level 1~3 : 0.1(cm ² /s)							
Calculation time	100 tidal cycles							

상하층간에 약한 성층을 이루고 있기 때문에 연직 확산이 완만하다고 가정하여 전 층에 0.1 cm²/sec를 적용하였다.

2.2.2.2. 저질 영양염 용출 부하

대상해역의 수질오염에 대한 영양염류의 물질수지를 고려할 경우, 저질의 역할이 중요하게 대두되고 있으며 혐기적 조건하에서는 저질로부터 영양염이 용출되어 다시 수층으로 공급이 될 수 있다. 이러한 오염물질을 저질 영양염 용출부하라 한다.

국내 해양저질에 관한 영양염 용출부하 연구를 보면, 김¹⁴⁾이 황해에서 측정된 암모니아질소와 인산인의 용출속도를 각각 24.65 mg/m²/d, 9.90 mg/m²/d로 산정하였고, 최⁴⁾가 진해만에서 52.0 mg/m²/d, 10.9 mg/m²/d로 조사되었다. 김⁵⁾은 진해만과 마산만을 대상으로 실측한 값을 바탕으로 생태계 모델링시 암모니아질소와 인산인의 용출속도를 각각 30.00 mg/m²/d, 8.00 mg/m²/d로 적용한 바 있다. 제주연안해역에서 용출속도를 실측한 자료는 없으므로 본 연구에서는 국내 문헌 조사값인 암모니아질소와 인산인의 용출속도를 각각 24.65 mg/m²/d와 9.00 mg/m²/d로 제주항의 시뮬레이션에 적용하였다.^{5,14)}

2.2.2.3. 생물학적 파라메타

생태계모델의 시뮬레이션에 이용한 생물학적 parameter는 Table 2와 같다. 모델에 사용된 입력자료는 실측 자료와 기존 측정된 자료를 이용하였고, 모델 parameter는 광범위하여 대부분은 문헌 조사를 통하여 선정하였다.

여기서 적용된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤에 대한 계수들은 제주항 및 제주연안해역에서 조사되어 있는 중에 대한 문헌 값¹⁵⁾을 이용하였다. 제주연안에서 출현하는 식물플랑크톤의 경우, Diatom 그리고 동물플랑크톤의 경우는 Copepoda가 차지하는 비율이 높기 때문에 이들 중에 대한 계수 값을 이용

Table 2. The biological parameters in ecosystem model for the Jeju Harbor

Symbol	Definition	Unit	Input values	Typical values
α_1	maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	1.20	0.55~3.40
β_1	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.0633	
α_2	respiration rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹	0.05	0.05~0.59
β_2	temperature coefficient	°C ⁻¹	0.050	0.044~0.052
α_3	maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹	0.18	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	0.090	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	0.070	0.041~0.070
α_7	mineralization rate of DOC at 0°C	day ⁻¹	0.004	0.002~0.043
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	0.536	0.032~5.263
K_{SN}	half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	μg-at/ℓ	8.571	0.214~66.070
I_{opt}	optimum intensity of radiation for photosynthesis	ly/day	195.8	
I_{max}	maximum intensity of sunlight at sea surface	cal/cm ² · day	461.5	
D	length of day	day	0.51	
k_0	dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m ⁻¹	0.34	0.34~1.70
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	70.0	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	%	35.0	21~35
K_{DO}^1	half concentration of DO for mineralization of POC	mg/ℓ	1.000	0.0035~1.000
K_{DO}^2	half concentration of DO for mineralization of DOC	mg/ℓ	1.000	0.0035~1.000
W_P	settling velocity of phytoplankton	m/day	0.100	0.005~0.4
W_{POC}	settling velocity of detritus(POC)	m/day	0.300	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
q_P	Ammonia release from sediment	mg/m ² /d	24.65	
q_N	Phosphorus release from sediment	mg/m ² /d	9.0	

하였다.¹⁵⁾

Chlorophyll a(mg/m³)와 식물플랑크톤의 탄소량(mgC/m³)에 대한 환산계수는 많은 연구자에 의해서 조사되었는데, 이 계수 값은 계절별로 차이가 있다고 보고되고 있다. C/Chl. a 비율을 변화시키는 요인은 빛의 세기, 영양염의 농도, 종조성 및 식물플랑크톤의 크기에 따라 차이가 나는데, 빛의 세기가 작은 상황에서는 Chl. a의 함량이 증가하며, 식물플랑크톤의 세포에서 Chl. a 농도와 빛의 세기와는 역상관성이 있다고 하였다.¹⁶⁻¹⁸⁾ 따라서 광이 성장제한 요인이면 C/Chl. a 비율은 감소한다.^{19,20)} 또한 영양염의 종류와 상관없이 영양염이 결핍될 때 C/Chl. a 비율이 증가하는데, 이는 세포내의 탄소량 증가와 Chl. a의 감소 때문이다.²¹⁾ C/Chl. a 비율은 식물플랑크톤의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 가진다.²²⁾ 심 등²³⁾은 천수만을 대상으로 조사한 C/Chl. a 비에서 하계 6월의 평균 측정값으로 표층의 경우 30을 적용하였고, 김⁵⁾은 진해만에서 하계 평균값으로 31을, 마산만에는 15를 적용하였다. 황해를 대상으로는 김¹⁴⁾과 김²⁴⁾이 68을 적용하였고, 제주 중문 연안역에서 신²⁵⁾이 50을 적용하였으며. 본 모델에서는 C/Chl. a의 비를 신²⁵⁾의 자료를 이용하여 50을 적용하였다.

2.3. 제주항의 수질시물레이션

제주항의 수질시물레이션을 하기 위해 해수유동 모델과 생태계 모델로 구성된 물질순환모델을 이용하였고, 그 결과를 이용하여 제주항의 수질개선을 위한 오염부하량 저감방안을 평가하였다.

생태계모델은 3차원 해수유동모델의 계산에서 얻은 잔차류를 입력자료로 이용하여 시물레이션을 행함으로써 제주항내의 COD, 용존무기질소(DIN) 그리고 용존무기인(DIP)의 분포를 시물레이션하였고 계산결과가 실측치와 어느 정도 일치하는지를 판단하기 위해서 수질조사를 실시한 5개 정점의 실측치와 계산치를 비교하였다.

제주항의 수질관리를 위한 저감방안으로는 제주항으로 유입되는 오염부하를 크게 두 가지로 구분하여 평가를 하였으며, 외부부하인 산지천을 통하여 제주항 내로 유입되는 육상오염부하와 내부부하인 저질 영양염 용출부하를 선택하여 제주항의 수질개선을 위한 방안을 도출하였는데 해양수질항목으로는 COD, DIN 그리고 DIP를 이용하여 정량적으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 해수유동 시물레이션

제주항에서의 조류분포특성은 전보¹³⁾에서 나타난

바와 같이 밀도류를 고려한 제주항의 경우 수심이 대체적으로 얇고 조석이 강함으로 인하여 표층, 중층 그리고 저층의 유동 형태나 유속 크기는 큰 변화가 없었다. 표층의 경우 항만 입구부에서는 30~40 cm/sec의 강한 유속대를 보여주고 있으나 항만의 중앙부분과 산지천이 있는 항만 안쪽 부분에서는 유속이 다소 감소하여 대체적으로 10~20 cm/sec 내외로 나타났다. 전반적인 유동양상을 보면 창조류와 낙조류 때의 유동은 위상이 반대인 것 외에는 거의 같은 유속분포를 보여주고 있는 것을 알 수 있었다.

전보¹³⁾에서 나타난 잔차류 패턴을 보면 항만 입구부에는 강한 와류가 발생되는데 이것은 주로 유속이 강하게 작용하는 조석류의 비선형 성분에 의하여 발생된 것으로 사료된다. 표층에서는 담수유입에 의한 밀도류가 나타났는데, 중층 아래에서는 그 성분이 약해지면서 반대로 하구쪽으로 향하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보면, 저층에 침강한 오염물질은 외해로 유출되지 못하고 점차적으로 하구 내만에 축적될 수 있을 것이다.

3.2. 생태계 시물레이션

3.2.1. 수질 시물레이션

생태계모델은 3차원 해수유동모델의 계산에서 얻은 잔차류 결과와 Table 1에서 Table 3까지 제시한 초기조건, 경계조건 그리고 하천오염 부하량을 모델에 입력한 후 시물레이션을 실행하였다. 시물레이션된 제주항내의 COD, DIN 그리고 DIP의 수층별 분포는 Fig. 2에 나타내었다.

COD의 분포를 살펴보면 표층의 경우, 지점별 분포특성으로 제주항 내로 유입하는 산지천의 영향을 가장 크게 받는 정점 St. 1 부근의 농도는 3.5 mg/L에서 4.2 mg/L의 높은 농도값을 나타내었고, 만폭이 좁아지는 St. 3 부근의 농도는 2.0 mg/L 수준을 유지하는 것으로 나타났으며, 제주항에서 폭이 가장 넓은 지역인 St. 4 부근은 대체적으로 1.5 mg/L에서 2.0 mg/L의 농도분포를 나타내었다. 전체적인 확산 경향을 보면 제주항의 부두와 접안시설이 있는 동쪽이 방파제가 있는 서쪽보다 확산이 지형적인 이유로 약해지는 경향을 보인다. 중층과 저층인 경우의 COD 농도분포를 보면 표층과 유사한 확산 경향을 보이고 있으나 확산범위는 저층으로 갈수록 그 정도가 표층에 비해 상대적으로 약해지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 확산경향은 산지천에서 유입되는 담수로 인하여 밀도류가 형성되어 표층에서 확산이 많이 되는 것으로 사료된다.

DIN의 분포를 살펴보면 표층의 경우, 제주항 안쪽인 정점 St. 1 부근의 농도는 약 32 µg-at/L에서 60 µg-at/L까지 매우 높은 농도값을 보이고 있으며,

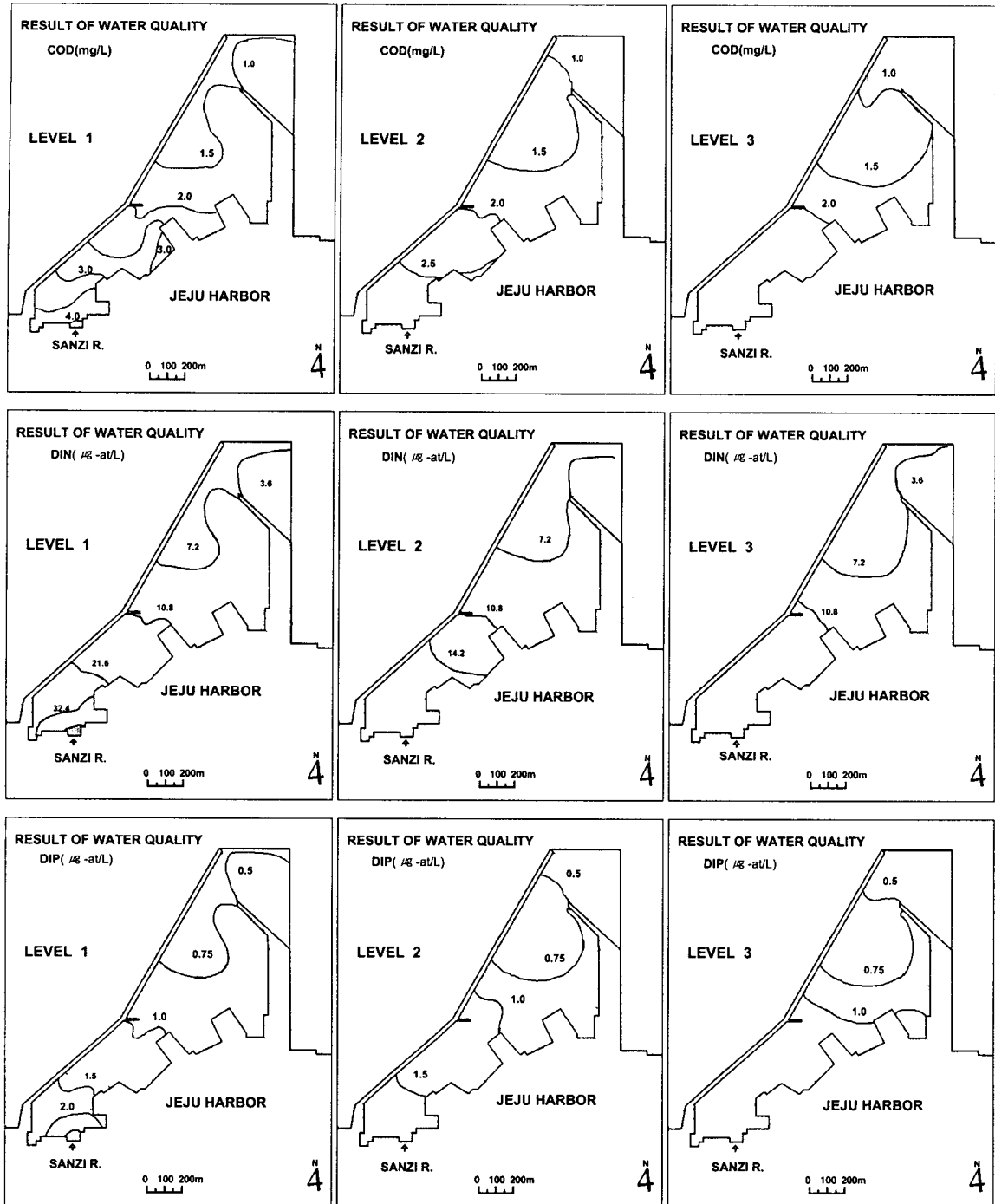


Fig. 2. The distribution of the simulated COD, DIN and DIP in Jeju Harbor.

이는 산지천 유입지점에서는 매우 높은 농도로 나타나고 있으나 해역으로 유입되어 물리적인 희석현상으로 인하여 외해로 나갈수록 농도가 낮아지고 있으며, 만 중앙부인 St. 3, 4에서는 $7 \mu\text{g-at/L}$ 에서

$10 \mu\text{g-at/L}$ 의 농도분포로서 제주항내에서 가장 넓은 지역을 차지하고 있다. 중층, 저층의 DIN의 분포를 살펴보면 확산 경향이 유사하게 나타나나 그 범위는 저층으로 갈수록 약해지는 것을 알 수 있으며,

이 현상 역시 COD농도 분포와 유사한 경향을 보였다.

DIP의 분포를 살펴보면 표층의 경우, DIN과 마찬가지로 제주항의 하천 유입부쪽에서 약 $2.0 \mu\text{g-at/L}$ 에서 $2.9 \mu\text{g-at/L}$ 까지 고농도의 분포를 보이며 급격히 감소하는 경향을 나타내고, 제주항에서 가장 넓은 지역인 정점 St. 4 부근의 농도는 $0.8 \mu\text{g-at/L}$ 로 넓게 분포하고 있다. 중층, 저층의 경우도 표층과 유사한 확산 경향을 나타내고 있다.

3.2.2. 생태계모델의 보정

생태계모델의 적용가능성을 검토하기 위해서 제주항내 5개 정점에서 각 수층별 COD, DIN 그리고 DIP의 실측값과 계산값을 상대오차를 이용하여 비교하였으며 Fig. 3에 나타내었다.

COD의 경우, 대체적으로 실측치에 비하여 계산치가 낮은 값을 보이고 있으며, 지점별로는 만 입구부의 정점에서 다소 높은 상대오차를 나타내었으나 평균 22.2%로 전체적으로는 COD농도의 상대오차는 양호한 것으로 사료된다. DIN의 경우, 평균 17.2%의 오차를 보였고 DIP의 경우, 제주항 중앙부에서는 계산치가 높게 나오고 하천유입부와 항 입구부에서는 계산치가 실측치보다 대체적으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며 평균 27.1%의 오차를 보였다.

이상의 결과를 이용하여 실측치에 대한 계산치가 적합한지를 판단하기 위하여 각 항목별로 단순회귀 분석을 실시하여 적합성을 검토하여 유사정도를 검토하였다. 분석결과 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수 R^2 (coefficient determination)은 COD의 경우 0.901로 90.1%가 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났으며, DIN의 경우는 0.976, DIP의 경우는 0.806으로 나타나 표본회귀선이 전체자료의 80% 이상을 반영하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로 볼 때 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 대상해역의 수질현황을 적합하게 시뮬레이션된 것으로 사료된다.

3.3. 오염부하의 정량적 관리

대상해역의 수질을 예측하고 적절하게 관리하기 위해서는 물질의 유입 및 이동에 대한 정밀한 평가가 있어야 한다. 즉, 수질예측모델을 이용하여 대상해역에서 적절한 관리대책의 효과를 정량적으로 평가하고 적용할 필요가 있다. 따라서 제주항에서 생태계 모델을 이용하여 COD, DIN 그리고 DIP의 저감량을 정량적으로 검토하였다.

3가지 평가방법으로 나누어 평가를 하였으며, 첫 번째로는 육상오염부하인 COD, DIN 그리고 DIP의 하천오염 부하량을 일률적으로 20%, 40%, 60%,

80%, 그리고 100% 감소시키면서 시뮬레이션한 농도분포를 각 정점별로 나타내어 제주항에 미치는 영향을 평가하였고, 두 번째로 내부부하인 저질 용출부하에 대하여 일률적으로 20%, 40%, 60%, 80%, 그리고 100% 감소시키면서 시뮬레이션한 제주항에서의 영양염의 농도 분포를 각 정점별로 나타내어 정량적으로 평가하였으며, 마지막 평가방법으로는 제주항의 총 부하 즉, 하천오염 부하량과 저질용출 부하량을 100% 저감시켰을 때 COD, DIN 그리고

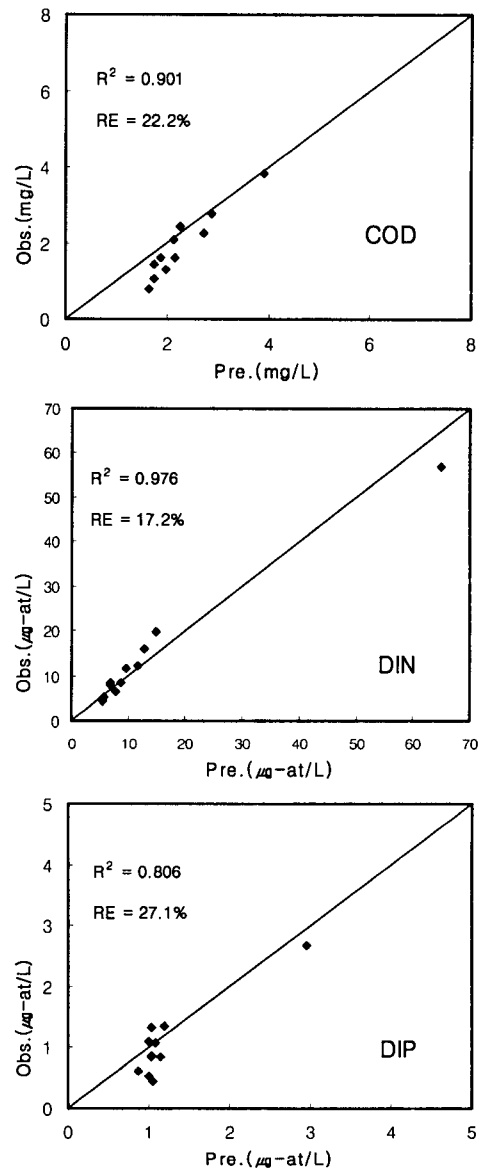


Fig. 3. Comparisons between predicted and observed water quality.

DIP의 농도분포를 시뮬레이션하여 제주항의 수질개선 효과를 계산하였다.

3.3.1. 하천오염부하의 정량적 관리

제주항의 하천유입 부하량을 단계적으로 저감시켰을 때, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 해역 중의 COD농도의 각 정점별 저감은 정점 St. 1에서는 3.9 mg/L에서 2.3 mg/L까지 단계적으로 감소하여 100% 저감 시 41% 정도의 저감효과를 보이고, 정점 St. 2에서는 2.9 mg/L에서 2.2 mg/L까지 약 24%의 저감효과를 보이나 그 외의 정점에서 7%미만의 미미한 제거효과를 나타내어 해역에서 유기오염의 지표인

COD에 대한 하천오염부하의 영향은 하천 유입부에서 어느 정도의 영향을 미치나 만 중앙부와 항 유입부로 갈수록 저감효과가 크게 감소하여 한정된 영향범위를 나타내고 있다.

제주항의 각 정점별 DIN의 저감효과를 보면, 정점 St. 1에서는 56.8 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 12.4 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 78%의 저감효과를 보이고 부하량의 60%정도만 제거해도 약 50%의 상대적으로 큰 저감효과를 보인다. 정점 St. 2에서는 19.7 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 11.4 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 42%의 저감효과를 보이고, 정점 St. 3에서는 17%가 저감되나 그 외의 정점에서는 외부부하의 한정된 영향범위를 나타내어 항 유입부로 갈수록 3% 미만의 적은 저감효과를 보이고 있다. 이 결과로 육상기원물질인 질소의 제주항 내로 유입을 방지함으로써 하천유입부의 수질개선에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 사료된다. 대상해역내 각 정점별 DIP의 저감효과를 보면, 정점 St. 1에서는 2.7 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 1.3 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 52%의 저감효과를 보이고, 정점 St. 2에서는 1.3 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 1.1 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 16%의 저감효과를 보이나, 그 외의 정점에서는 외부부하의 한정된 영향범위를 나타내어 항 유입부로 갈수록 4% 미만의 적은 저감효과를 보여 COD, DIN과 유사한 경향을 나타내고 있다.

이상의 결과를 보면, 외부부하인 하천유입 부하량의 감소에 의한 제주항 내 오염물질 농도의 저감효과는 만 중앙부에서 만 외로 갈수록 그 영향범위가 미비하나 하천유입부에 한정되어 큰 효과를 나타내고 있어 제주항 내로 오염부하의 유입을 방지함으로써 제주항의 하천유입부 수질개선에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 사료된다.

3.3.2. 저질 영양염 용출부하의 정량적 관리

저질의 영양염 용출부하를 일률적으로 20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100% 저감시켰을 때, 각 정점에서 영양염 농도의 변화는 Fig. 5에 나타내었다. DIN의 경우 정점 St. 1에서는 100% 부하 감소시 하천유입부의 질소는 5%, St. 2에서는 11%의 저감효과를 보여 하천유입부하의 감소에 의한 효과에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타내었고, 정점 St. 4에서 8.4 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 6.9 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감 시 18%의 저감효과를 보이며 이 결과는 하천유입부하를 감소시켰을 때의 미미한 효과에 비해 증가한 경향을 나타내어 용출부하를 80%정도 저감했을 때 DIN의 농도는 해역기준 III등급에서 II등급으로 수질이 개선되는 효과를 나타

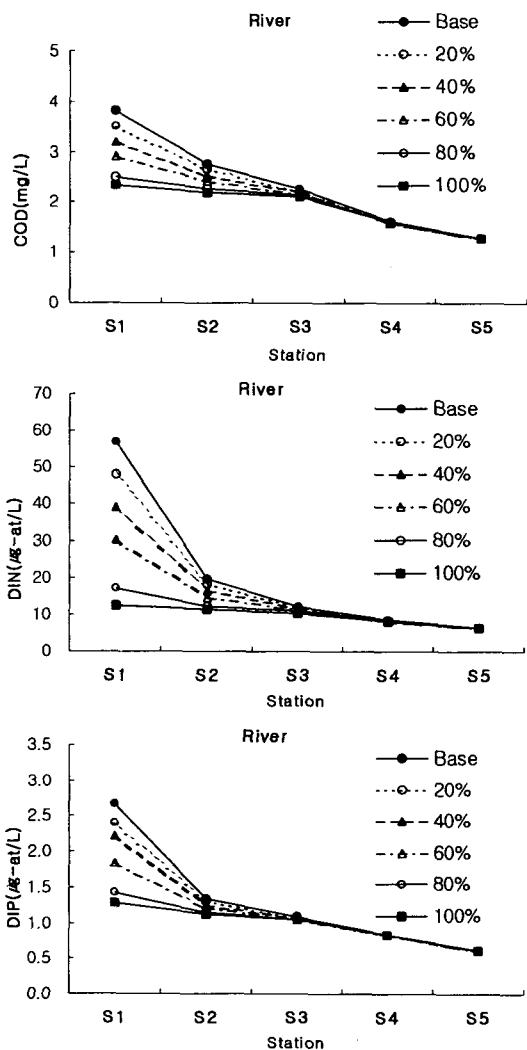


Fig. 4. The predictive concentrations of COD, DIN and DIP depending on pollutant loadings reduction from the river under the present condition.

내었다.

저질의 DIP 용출부하를 일률적으로 20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100% 감소시켜 각 정점에서 인의 농도 분포를 살펴보면, 정점 St. 1에서는 $2.7 \mu\text{g-at/L}$ 에서 $2.1 \mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 100%부하를 저감해도 21%의 저감효과를 나타내어 하천 부하량을 감소시켰을 때의 52%보다는 상대적으로 작은 효과를 나타냈지만, 그 외의 정점 St. 2, 3, 4 그리고 St. 5에서는 용출부하량의 감소에 따라 단계적으로 저감효과가 상승하는 경향을 나타내어 100% 저감시 각각 31%, 32%, 39% 그리고 28%로 나타났다. 정점 St. 4에서는 용출부하를 100% 저감시 III등급에서 II등급으로 수질이 개선되는 효과를 나타내었으며, 정점 St. 5에서는 내부부하인 저질용출부하를 60%정도 저감하여도 해양기준 II등급 이하의 수질을 유지하면서 만 외로 유출되는 경향을 나타내었다.

이상의 결과를 보면, 내부부하인 저질 영양염 용출부하를 감소했을 경우의 제주항 내 영양염 농도의 저감효과는 하천유입 부하량의 저감시와 상대적으로 비교하여 제주항의 하천 유입부보다는 만중앙부나 만 유입부의 수질개선에 효율적인 영향을 보

이는 것으로 사료되며 특히, DIP의 경우 그 양상이 잘 나타났으며 제주항의 수질특성과 잘 일치하는 것으로 사료된다.

3.3.3. 총 오염부하의 정량적 관리

DIN과 DIP의 주요 공급원인 하천에서의 오염부하량과, 저질로부터 용출부하에 대하여 각각 100% 저감시켰을 때와 부하량 전체를 저감시켰을 경우를 비교하여 Fig. 6에 농도분포를 나타내었다.

하천과 저질의 총 부하량을 100% 감소했을 경우, COD의 농도분포는 하천유입부인 정점 St. 1에

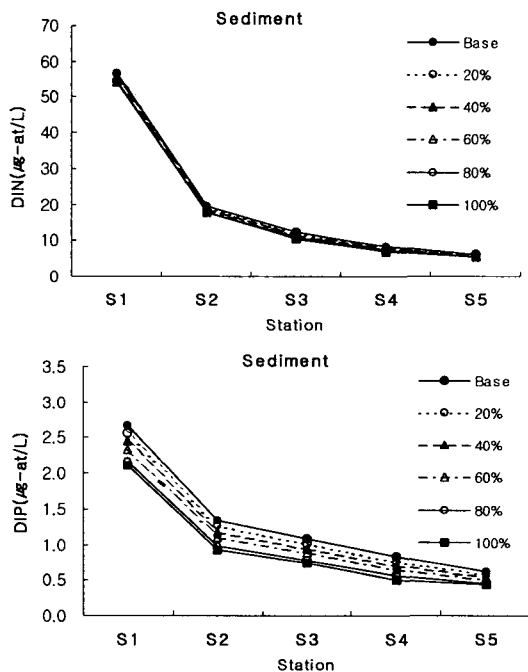


Fig. 5. The predictive concentrations of DIP and DIN depending on various sediment flux rate under the present condition.

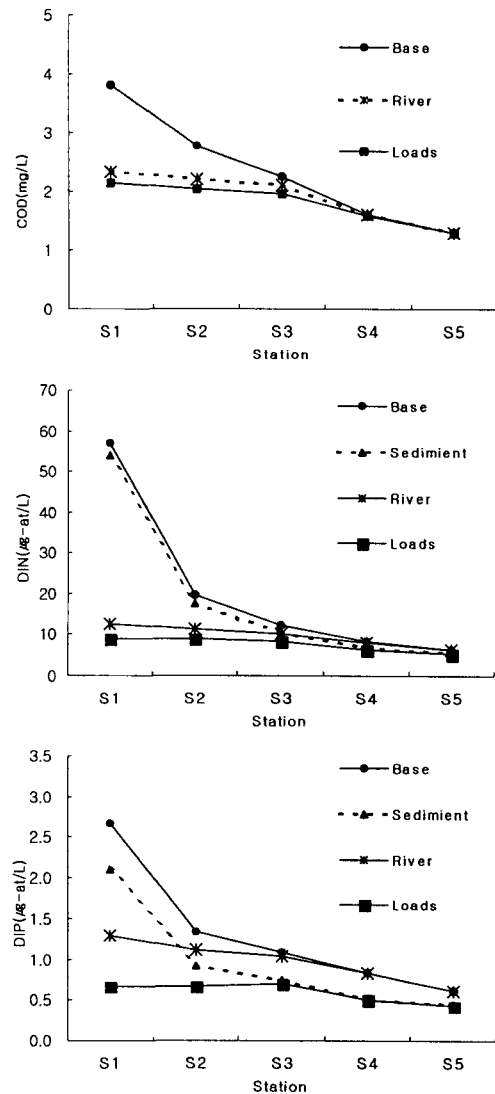


Fig. 6. The predictive concentrations of COD, DIN and DIP depending on pollution loads reduction in the model area under the present condition.

서 3.9 mg/L에서 2.2 mg/L 정도로 약 44% 정도의 저감효과를 나타내어 하천유입 부하량을 감소했을 때보다는 저감효과가 증가하였지만 뚜렷한 경향을 보이지는 않았으며, 정점 St. 2에서는 2.9 mg/L에서 2.0 mg/L 정도로 약 31% 정도의 저감효과를 나타내어 COD농도가 해역수질기준 II등급 이하로 개선되었다. 그리고 정점 St. 3에서는 하천오염부하만을 감소했을 경우 보다 저감효과가 2배정도 증가하는 경향을 나타내었다.

DIN의 경우를 살펴보면, 하천유입부인 정점 St. 1, 2에서는 용출부하보다는 하천오염부하를 저감하였을 때 질소의 제거가 78~50%로 큰 효과를 나타내었으나, 이에 반해 정점 St. 3에서 만 외로는 하천오염부하보다 용출부하의 저감에 의한 저감효과가 크다는 것을 나타내고 있으며 용출부하 80% 저감시 정점 St. 4에서 해역수질기준 II등급(7.14 $\mu\text{g-at/L}$ 이하)을 유지하는 것으로 나타났다. 총 부하량을 100% 저감시켰을 경우 하천유입부인 정점 St. 1에서 DIN의 농도가 56.8 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 9.0 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 85%의 가장 큰 저감효과를 보였으며, 정점 St. 2에서는 19.7 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 9.0 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 54%의 저감효과를 나타내었고, 그 외의 정점 St. 3, 4 그리고 St. 5에서 각각 31%, 24% 그리고 16%의 제거효과를 나타내어 하천유입부하와 저질 용출부하를 각각 따로 저감했을 경우에 비해 전체적으로 저감효율이 상승하고 있으며, 이러한 결과는 만 중앙부에서 만 유입부로 갈수록 그 경향이 잘 나타나고 있다. 이와 같은 결과로 총 부하를 저감시켰을 때 제주항내의 DIN 농도는 정점 St. 3 이후로 해역수질기준 II등급을 유지되는 수질개선 효과를 나타내었다.

DIP의 경우를 보면, 정점 St. 1은 유입하천부하를 100% 저감시켰을 때 52%의 효과를 나타내어 21%의 용출부하 저감에 의한 영향보다는 크게 나타났으나, 반면에 정점 St. 2, 3, 4 그리고 St. 5에서의 용출부하 저감시 유입하천부하의 경우보다 각각 정점별로 15%, 28%, 38% 그리고 28%의 차이를 보여 저감효과가 상승하는 경향을 나타내었으며, 용출부하를 약 60%정도 저감시 정점 St. 5에서 만 외부로 갈수록 해역수질기준 II등급(0.48 $\mu\text{g-at/L}$ 이하) 이하를 유지하여 유출되는 경향을 나타내었다. 총 부하량을 100% 저감시켰을 경우를 보면, 하천유입부인 정점 St. 1에서 DIP의 농도가 2.66 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 0.66 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 75%의 가장 큰 저감효과를 보였고, 정점 St. 2에서는 1.34 $\mu\text{g-at/L}$ 에서 0.67 $\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 50%의 저감효과를 나타내었으며, 그 외의 정점 St. 3, 4 그리고 St. 5에서

각각 36%, 40% 그리고 29%의 저감효과를 나타내었다. 이 결과는 하천유입부하와 저질용출부하를 각각 따로 저감했을 경우에 비해 전체적으로 저감효율이 상승하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과로 총부하를 저감시켰을 때 제주항내의 DIP 농도는 정점 St. 4이후로 해역수질기준 II등급 이하로 유지되는 수질개선 효과를 나타내었다.

이상의 결과로 보면 현재 해역수질기준 III등급인 제주항내에서 하천유입부하량의 저감뿐만 아니라 항내 저질개선 등을 통하면 전체적으로 II등급 이하를 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

제주항을 대상으로 오염부하의 정량적인 관리를 위하여 물질순환모델을 이용하여 해수유동특성과 COD, DIN 그리고 DIP의 농도분포를 시뮬레이션 하였고, 이 결과를 통해 해역의 수질개선대책으로 하천오염부하 감소와 저질개선을 통한 용출부하 감소에 따른 COD, DIN 그리고 DIP의 농도를 정량적으로 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 외부부하인 하천유입 부하량의 감소에 의한 제주항 내 오염물질 농도의 저감효과는 만 중앙부에서 만 외로 갈수록 그 영향범위가 미비하나 하천유입부에 한정되어 큰 효과를 나타내고 있어 제주항 내로 오염부하의 유입을 방지함으로써 제주항의 하천 유입부 수질개선에 큰 영향을 줄 수 있다.
- 2) 내부부하인 저질 영양염 용출부하를 감소했을 경우의 제주항 내 영양염 농도의 저감효과는 하천유입 부하량의 저감시와 상대적으로 비교하여 제주항의 하천 유입부보다는 만 중앙부나 만 유입부의 수질개선에 효율적인 영향을 보이는 것으로 사료되며 특히, DIP의 경우 그 양상이 잘 나타났다.
- 3) 하천과 저질의 총 부하량을 100% 감소했을 경우, COD의 농도분포는 하천유입부인 정점 St. 1에서 약 44% 정도의 저감효과를 나타내어 하천유입 부하량만을 감소했을 때보다는 저감효과가 증가하였다. DIN의 경우는 하천유입부하와 저질 용출부하를 각각 따로 저감했을 경우에 비해 전체적으로 저감효율이 상승하고 있으며, 만 중앙부에서 만 유입부로 갈수록 그 경향이 잘 나타나고 있으며 총 부하를 저감시켰을 때 제주항내의 DIN 농도는 정점 St. 3 다음 지점부터 해역수질기준 II등급을 유지되는 수질개선 효과를 나타내었다. DIP의 경우는 DIN과 유사한 경향을 보였으며 정점 St. 4 이후로 해역수질기준 II등급 이

하로 유지되는 수질개선 효과를 나타내었다.

이상의 결과로 볼 때, 현재 해역수질기준 III등급인 제주항 내에서 수질을 향상시키기 위해서는 하천유입부하량의 저감뿐만 아니라 항내 저질개선 등을 통하면 전체적으로 II등급 이하를 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 제주대학교 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

- 1)堀江 毅, 1990, 海域の水質・生態系の數値モデル, 土木學會論文集 第417號/II-13, 21-31.
- 2)堀口孝男, 富田 勇, 堀江 毅, 1977, 三次元モデルによる流れと擴散 數値解法, 沿岸工學講演會 論文集, 24, 443-447.
- 3) Cerco, C. F. and T. Cole, 1993, Three-Dimensional Eutrophication Model of Chesapeake Bay, Journal of Environmental Engineering, 119(6), 1006-1025.
- 4) 최우정, 1993, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션, 부산수산대학교 대학원 박사학위 논문, 97pp.
- 5) 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 130pp.
- 6) 조은일, 1996, 생태계모델을 이용한 어장환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 139pp.
- 7) 김종구, 김양수, 조은일, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용(2), 한국수산학회지, 35(4), 356-365.
- 8) 양성기, 최찬문, 1999, 제주항의 해양수리학적 특성, 제주대 해양연구논문집, 23, 9-21.
- 9) 김상현, 노홍길, 최찬문, 1998, 제주도 북부연안역의 해황과 조석전선 특성, 한국수산학회지, 31(3), 437-446.
- 10) 조은일, 박정길, 1998, 제주도 항만의 수질특성 및 예측, 제주대 해양연구논문집, 22, 163-171.
- 11) 김광수, 최영찬, 2000, 생태계모델을 이용한 제주도 남부해역의 환경용량산정, 한국해양환경공학회지, 3(1), 52-61.
- 12) 조은일, 강기봉, 2003, 물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(II) - 제주항의 수질특성과 오염부하량 산정 -, 한국환경과학회지, 12(3), 299-306.
- 13) 조은일, 이병길, 오윤근, 2002, 물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(I) - 제주항의 물리해양환경의 변화 -, 한국환경과학회지, 11(1), 25-32.
- 14) 김광수, 1995, 생태계모델을 이용한 황해의 환경용량산정, 부산대학교 대학원 박사 학위논문, 159pp.
- 15) 제주도, 1997, 제주도 친환경개발을 위한 환경지표설정, 48-90.
- 16) Eppley, R. W., E. H. Renger, E. L. Venrick and M. M. Mullin, 1973, A study of phytoplankton dynamics and nutrient cycling in the central gyre of the North Pacific Ocean. Limnol. Oceanogr., 18(4), 534-551.
- 17) Fee, E. J., 1976, The vertical and seasonal distribution of chlorophyll-a in lakes of the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario : Implication for primary production estimates, Limnol. Oceanogr., 21, 767-783.
- 18) Brown, T. E. and F. L. Richardson, 1968, The effect of growth environment of the physiology of algae by light intensity, J. Phycol., 4, 38-45.
- 19) Laws, E. A. and T. T. Bannister, 1980, Nutrient and light-limited growth of (*Thalassiosira Fluviatilis*) in continuous culture, with implications for phytoplankton growth in the ocean., Limnol. Oceanogr., 25, 457-473.
- 20) Hunter, B. L. and E. A. Laws, 1981, ATP and chlorophyll a as estimators of phytoplankton carbon biomass, Limnol. Oceanogr., 26(5), 944-956.
- 21) Thomas, W. H. and A. N. Dodson, 1972, On nitrogen deficiency in tropical Pacific Ocean phytoplankton, Limnol. Oceanogr., 17(4), 515-523.
- 22) Takahashi, M. and P. K. Bienfang, 1983, Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters, Mar., Biol., 203-211.
- 23) 심재형, 심윤근, 1989, 천수만 일차생산자의 생물량 : 식물플랑크톤 탄소량과 세포 개체수 및 클로로필과의 관계, 한국해양학회지, 24, 194-205.
- 24) 김동명, 1999, 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 부경대학교 대학원 박사학위논문, 135pp.
- 25) 신범, 이준백, 2002, 제주 중문연안역의 초미세, 미소, 소형 플랑크톤 시·공간적 분포, 한국해양학회지, 7(2), 78-86.