

2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링

홍석진* · 이원찬* · 정래홍* · 오현택* · 장주형* · 구준호* · 김동명**

* 국립수산업과학원 환경연구팀, ** 부경대학교 생태공학과

Ecosystem Modelling for Improvement Summer Water Quality of Jinhae Bay in 2003

Sok Jin Hong* · Won Chan Lee* · Rea Hong Jung* · Hyun Tek Oh* · Ju Hyung Jang*

Jun Ho Goo* · Dong Myung Kim**

* Environmental Research Team, National Fisheries Research Development Institute

** Major of Ecological Engineering , Pukyung National University, Busan, 608-737, Korea

요 약 : 2003년 하계 진해만의 수질개선을 위한 육상오염물질 삭감량을 산정하기 위해 생태계 모델을 적용하였다. 모델에 의해 재현된 진해만의 수질은 마산만 측의 내측에서 해양수질 등급 III 을 상회하는 수준으로 나타났으며, 등급 II의 수질로 개선하기 위해서는 육상부하를 50% 삭감하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 진해만 전 해역을 목표수질인 화학적 산소요구량(COD) 농도 2.0mg/L을 만족하는 조건은 전체 육상부하의 70~90% 를 삭감하거나, 전체 육상부하와 저질 용출부하의 50%를 동시에 삭감하여야 하는 것으로 나타났다. 해역 II등급을 유지하기 위해 삭감해야 할 양은 유기물과 영양염을 동시에 삭감할 경우, 유기물 (COD) 5,632kg/day, 용존무기인 481kg/day 및 용존무기질소 7,991kg/day 이며, 이 때 오염부하량의 한계 즉, 환경용량은 화학적산소요구량 부하 13,112kg/day, 용존무기인 206kg/day 그리고 용존무기질소 3,425kg/day 이라고 할 수 있다.

핵심용어 : 생태계 모델, 환경용량, 화학적 산소요구량, 용존무기질소, 용존무기인, 부하삭감, 진해만

ABSTRACT : This study estimated the appropriate pollutant load reduction from point sources in Jinhae Bay, Korea, using an eco system model. The results of COD values in the inner part of the bay obtained through the simulation by ecosystem model were greater than 3.0 mg/L, and exceeded the limits of Korean Coastal Water Quality Grade III. Engineering countermeasures to reduce the 70~90% of all land based pollution load or organic and inorganic material loads from point sources by more than 50% were required to keep the COD levels below 2 mg/L. The reduction loads is 5,632kg/day of COD, 481kg/day of DIP and 7,991 kg/day of DIN in case of the reduction of both the organic and nutrients. The estimated environmental carrying capacity of that case is 13,112kg/day of COD, 206kg/day of DIP and 3,425 kg/day of DIN to keep the COD levels below 2 mg/L.

KEY WORDS : Ecosystem model, Environmental carrying capacity, COD, DIN, DIP, Pollutant load reduction, Jinhae Bay

1. 서 론

해양 환경의 영양상태를 평가하는 기준은 연안해역의 보호와 관리를 위한 매우 중요한 수단으로 사용되고 있다. 연안해역 관리를 위하여 지난 30년 동안 과학적인 조사·연구를 통하여 괄목할 만한 진전이 이루어져 개념적인 모델까지 개발하였지만 (Cloern, 2001), 과학자들은 연안 생태계 관리를 위하여 사용할 수 있는 유용한 도구는 아직까지 제한적인 상태라고 보고하고 있다(Cloern, 2001; Cognetti, 2001). 연안환경의 영양상태를 분석하는 기존의 연구들은 무기 영양염 농도(질소, 인), 식물플랑크톤 군집분석(구조, 기초생산, 성장률), 선택적인 이화학 인자

(탁도, 용존산소) 등에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 육상에서 공급되는 영양물질과 수서 환경의 영양상태를 변화시키는 이들 물질의 역할에 대해서 많은 연구자들이 주로 연구하여 왔지만, 하구를 포함한 연안생태계의 기능에 관련된 영양물질들의 영향은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않은 상태다.

부영양화는 육상으로부터 유입되는 외래 기원 영양물질의 공급으로 인한 수서생태계의 생물학적인 반응으로서 최근에 호수와 강뿐만 아니라 연안해역 등에서 광범위하게 나타나는 현상이다(Ménesguen, 1990; Nixon, 1995). 연안으로 유입되는 영양물질의 증가는 모래해변과 같은 천해역에서 대형조류 번식 또는 심해역의 식물플랑크톤 이상증식에 의한 적조 발생 등 해양조류의 이상증식을 초래하고 궁극적으로는 저층의 저산소(hypoxia)를 형성하는 요인이 되고 있으며, 빈산소 수괴를 형성하여 저서 무척추동물과 어류의 대량 폐사를 유발하고 있다.

* 대표저자 : 정희원, eutro@paran.com, 051)720-2255

진해만은 한국 남동부 해역에 위치하고 있으며 마산만, 진동만, 당동만, 원문만, 고현만 등 소규모만으로 이루어진 반폐쇄성 내만으로 수산양식업이 활발하게 성행하고 있다. 진해만의 수면적은 637 km²이고, 수심은 지형변화에 따라 5~20 m범위이며, 조류는 반일주조가 우세하고 가덕수로에서 50 cm/s로 빠르게 유입하여 만 내측으로 갈수록 급격히 감소하여 5 cm/s이하의 매우 낮은 유속을 보이고 있다. 또한, 마산, 창원, 진해, 고현 등 급격한 산업화와 도시화로 인해 수질환경은 급격히 악화되어 해마다 하계에는 빈산소수괴와, 적조가 상습적으로 발생하고 있다. 아울러, Okaichi(1985)가 제시한 부영양도 평가방법을 이용하여 계산된 2000년 진해만의 부영양도 지수는 8.1로 부영양화 기준을 8배 이상 초과하고 있어 전형적인 한국연안해역의 부영양 수역으로 보고되고 있다(해양수산부, 2002).

부영양화된 연안해역의 수질을 개선하기 위해서는 해역 자체가 지닌 자정능력인 환경용량에 적합하도록 육상에서 유입되는 오염물질을 조절하는 것이 매우 중요하다. 이와 같이 수질개선을 위한 과학적인 방안을 제시하기 위한 도구로 최근에는 시뮬레이션 모델이 많이 사용되고 있다. 특히, 연안생태계의 저차 생산자를 기반으로 한 생태계모델은 육상에서 유입되는 영양염을 이용하여 성장하는 식물플랑크톤의 생산성과 식물플랑크톤의 생리활성 저하로 인한 입자유기물 생성, 분해, 침강 및 영양염 재생산 등에 대한 역학적인 관계를 생태공학적인 기법으로 해수-퇴적물의 물질순환 과정을 해석할 수 있기 때문이다. 국내의 많은 연구자들이 생태계모델을 이용하여 연안해역의 부영양화 현상, 환경용량 산정 및 오염부하 삭감에 따른 생태계 응답 특성 등 다양한 분야에서 활발하게 연구를 진행하고 있다(Lung, 1988; Takeshi, 1988; Mark & Bunch, 1992; Takeoka & Muraio, 1997; 김 등, 1996; 김 등, 1999).

따라서, 본 연구는 부영양화가 심각한 진해만의 수질개선을 위해 목표수질을 COD 2 mg/L로 설정하고 이를 달성하기 위한 육상오염 부하량의 삭감량을 산정하고자 한다.

2. 생태계 모델

2.1 생태계 개요

생태계모델(Ecosystem model)은 해수유동 모델과 생태계 모델로 구성되어 있으며, 연안역 수질의 재현과 평가에 유용한 수단이 될 수 있다. 특히 생태계에 대한 총괄적인 접근을 위해서는 해역내에서 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 질소 및 인의 순환을 포함한 생태학적 관련인자의 관계를 포함한 생태계 모델의 이용이 필수 불가결하다. 본 연구에서는 해수유동 모델은 中田 등(1985)에 의해 개발되어 적용된 다층모델이며 생태계 모델은 Kremer와 Nixon(1978)에 의해 개발, 적용된 모델의 지배방정식을 바탕으로 grid 모델 형태로 구성되어 있다. 이 모델링 시스템은 최 등(1994), 김 등(1994) 등에 의하여 국내 연안환경에 적합하도록 연구 개량되어 그 적용성이 검토되

었으며, 진해만과 마산만 해역에서 기초생산생태계와 환경용량 산정에 주로 이용되어왔다. 본 연구에서 적용된 생태계모델은 (EUTROP2) 8개의 구성요소, 즉, 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 입자유기탄소(POC), 용존유기탄소(DOC), 용존무기인(DIP), 용존무기질소(DIN), 용존산소(DO) 및 화학적 산소요구량(COD)등으로 이루어져 있으며, 해양생태계 내의 각 구성요소들 사이에 질소(N), 인(P) 및 산소(O₂)의 생화학적 순환 과정을 수식화 하였다(Fig. 1). 본 모델은 영양염의 이동경로를 쉽게 파악할 수 있고 해역의 부영양화현상과 관련된 제과정의 이해와 그들의 제어를 위한 목적으로도 이용 가능하다(堀江毅,1990).

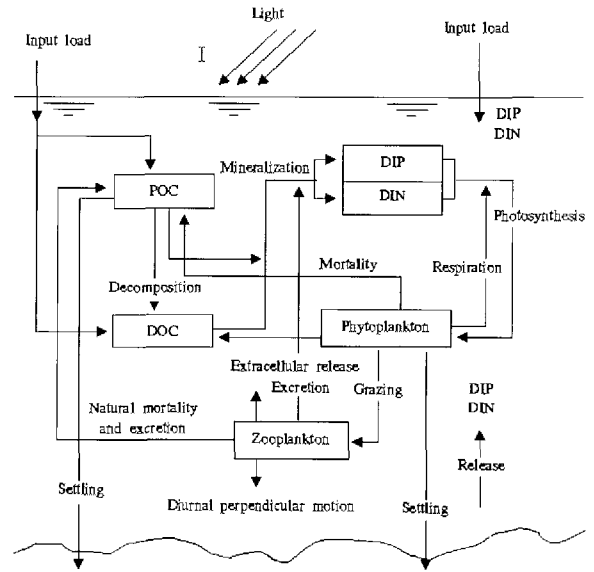


Fig. 1. The schematic diagram of ecosystem model.

2.2 모델 입력자료

모델 영역(Fig. 2)은 외해 개방 경계를 가덕도 남단과 거제도 동안을 가로질러 연결하는 선과 거제도 서안과 통영해만을 연결하는 선으로 설정하여, 동서 및 남북방향으로 500 m의 정방 격자로 이루어진 37,350개 (90×83×5)의 격자망으로 구성하였다. 수층은 밀도 및 수온 약층의 깊이를 고려하여 표층 (Level 1: 해면~수심 5m), 2층 (Level 2: 수심 5 m~10m), 3층 (Level 3: 수심 10 m~15 m), 4층 (Level 3: 수심 15 m~20m), 5층 (Level 3: 수심 20 m~해저)으로 구성하였다. 진해만 인근해역을 포함한 남해안은 연중 가장 안정한 유동이 조류이고 가장 탁월한 조석이 M2분조이므로 해수 유동을 재현하기 위해서 M2분조를 적용하였다. 개경계에서 진폭과 위상은 가덕도 남단은 57.5cm, 244.7도, 거제도 동안은 57.5 cm, 247.5°를 적용하고, 두지점 사이의 각 격자점의 진폭과 위상은 보간하여 적용하였다. 지형 및 수심은 해도 No. 206, No. 204(대한민국 국립해양조사원, 2004) 을 사용하였으며, 진해항 및 행암만 일부의 군사시설의 경우 주변지형과 개략적으로 맞도록 보간하여 이용하였다. 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙하였고

여름철에 바람이 없는 빈도수가 높아 모델에서는 0.0 m/sec의 조건으로 입력하였다. 수온과 염분은 2003년 국립수산과학원의 현장관측 자료를 이용하여 각 층별로 적절한 값을 입력하였다. 1~5 층에서 수온은 23.0~24.0℃ 염분은 28.4~29.0의 값을 적용하였다. 해저마찰계수는 일반적으로 해의 안정성을 고려하여 $k=0.0025$ 를 적용하였다. 수평 확산계수는 진해만(최등, 1994)에서 적용되었던, $3.0 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였고, 수평와동 확산계수와 수평와동 점성계수는 $3.0 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였으며, 연직와동 확산계수의 경우는 1층에서 5층까지 $0.2 \text{cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다. Coriolis parameter가 위도에 따라 일정한 f-plane을 사용하였다. 육상의 하천을 통하여 모델 해역으로 유입하는 하천유량은 국립수산과학원에서 현장 관측한 8월의 자료를 적용한다. 해수유동 모델에서 얻어진 유속 및 조위가 정상상태(steady-state)에 도달한 이후 한 조석주기에 대한 평균유속을 구해 생태계 모델의 기본 유동자료로 입력하였으며, 격자의 구성은 해수유동모델과 동일하고 계산시간간격(Δt)은 600 sec 로 하였다. 각 층별 용존산소, 영양염 등의 초

2.3. 입력부하량

하천 유량 및 부하량의 기여율을 Table 2에 나타내었는데, 진천천이 전체 유입하천 유량의 17.53% 인 약 46만 톤/일으 가장 크게 나타났으며, 두 번째로는 덕동하수처리장의 방류 유량이 전체 유입하천 유량의 11.51%인 30만 톤/일이 유입되고 있다.

Table 2. Loading rate at each source into Jinhae Bay

classification	COD		DIP		DIN	
	sum, kg/day	contribution rate, %	sum, kg/day	contribution rate, %	sum, kg/day	contribution rate, %
sum	18,774	100.0	5,262	100.0	68,586	100.0
river	9,658	51.4	4	0.1	16.0	0.0
sewage treatment plants	9,116	48.6	683	13.0	11,400	16.6
sediment release	-	-	4,575	86.9	45,754	66.7

Table 1. The biological parameters used in the ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit	Used values
1	α_1	maximum growth rate of phytoplankton at 0℃	day ⁻¹	0.55
2	α_2	respiration rate of phytoplankton at 0℃	day ⁻¹	0.10
3	α_3	maximum grazing rate of zooplankton at 0℃	day ⁻¹	0.18
4	α_4	death rate of phytoplankton at 0℃	day ⁻¹	0.01
5	α_5	natural death rate of zooplankton at 0℃	day ⁻¹	0.054
6	α_6	mineralization rate of POC at 0℃	day ⁻¹	0.012
7	α_7	mineralization rate of DOC at 0℃	day ⁻¹	0.005
8	α_8	oxygen consumption rate of sediment at 0℃	day ⁻¹	1.000
9	K_{SP}	half saturation constant for uptake of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at 0℃	$\mu\text{g-at} \cdot \text{L}^{-1}$	0.30
10	K_{SN}	half saturation constant for uptake of DIN at 0℃	$\mu\text{g-at} \cdot \text{L}^{-1}$	3.00
11	I_{opt}	optimum intensity of radiation for photosynthesis	$\text{ly} \cdot \text{L}^{-1}$	200.0
12	I_{max}	maximum intensity of sunlight at sea surface	$\text{ly} \cdot \text{L}^{-1}$	856.0
13	k_0	dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m ⁻¹	0.57
14	P^*	function of grazing	$\text{mg C} \cdot \text{m}^{-3}$	75
15	μ	digestion efficiency of zooplankton	%	70
16	λ	total growth efficiency of zooplankton	%	30
17	κ	percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC	%	25
18	K_{DO}^1	half concentration of DO for mineralization of POC	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0
19	K_{DO}^2	half concentration of DO for mineralization of DOC	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.0
20	W_P	settling velocity of phytoplankton	$\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$	0.17
21	W_{POC}	settling velocity of detritus(POC)	$\text{m} \cdot \text{day}^{-1}$	0.43
22	[COD:C _P]	ratio of COD/C for phytoplankton	-	3.41E-04
23	[COD:C _Z]	ratio of COD/C for zooplankton	-	1.51E-03
24	[COD:C _{POM}]	ratio of COD/C for detritus(POC)	-	1.33E-03
25	[COD:C _{DOM}]	ratio of COD/C for DOC	-	1.12E-03
26	K_a	reaeration coefficient at sea surface	day ⁻¹	0.15

기농도와 개경계에서의 농도는 관측결과를 위주로 입력하되 적절히 조절하여 사용하였다. 생태계모델의 시뮬레이션에 이용한 생물학적 parameter는 기존의 국내 모델링연구에 이용되었던 자료 및 문헌 조사 결과를 기초로 진해만의 해양학적 특성을 고려하여 선정하였다(Table 1).

COD 부하량은 총 18.77 ton/day 로 나타났는데 이는 최 등(1994)의 연구에서 23.7~53.5 ton/day, 김 등(1994)의 연구에서 적용된 32.1 ton/day에 비해 매우 작은 값으로 이런 과거의 연구가 수행되었던, 1993~1994년의 하계 오염부하량에 비해 2003년 하계의 오염부하량이 거의 절반 수준으로 낮아진 것을 알 수 있다. 저질 용출부하량은 전체 진해만의 저층면적을

용출속도에 곱해서 구할 수 있는데, 본 연구에서는 생태계 모델에 적용된 500 m 격자크기에 격자수 가로 90개, 세로 83개를 고려하여 구한 면적 1,868 km²를 사용하였다. 이런 식으로 비교하면 진해만 전체의 주요 영양염 공급원은 저질 용출부하량으로 DIP 부하의 86.9%를 DIN 공급의 66.7%를 차지하고 있음을 알 수 있었다.

거제도 북단~잠도 상의 수로를 통해 창 낙조 시 약 40~50 cm/s의 크기로 진입하여, 진해만 중앙부에는 약 20~30 cm/s의 흐름이 나타나며, 만 서부의 내만으로 진행할수록 10 cm/s 이하의 유속을 나타낸다. 북상하던 흐름은 수심이 얕아지는 부도를 지나면서 얕은 수심으로 인해 유속이 약 10 cm/s 이하로 현저히 감소하며 마산만 내의 경우 평균 5 cm/s 내외의 유속을 가진다.

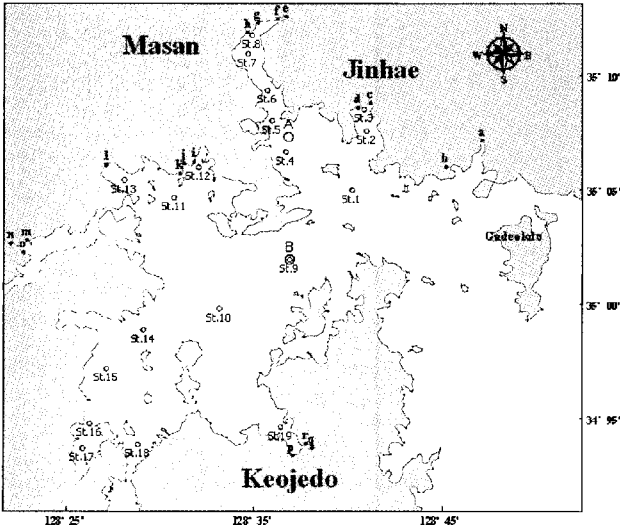


Fig. 2. Station map for pollution sources(a~q), seawater(st. 1~st.19) and site of tidal current comparison(A~B) in Jinhae bay.

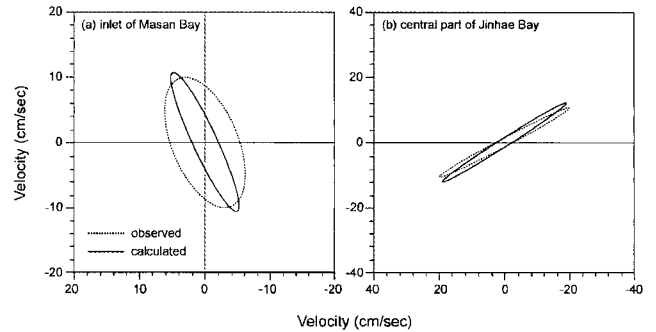


Fig. 3. Comparison of surface M₂ tidal ellipses between model calculations(solid line)and current meter observations(dotted line)on inlet of Masan Bay (left) and central part of Jinhae Bay(right).

3. model 수행결과

3.1 해수 유동 재현결과

생태계 모델의 유동장 입력자료로 이용하기 위해 진해만의 해수흐름을 해수유동모델로써 재현하였다. 총 계산시간은 해의 안정성을 고려하여, 20조석 주기로 하였으며, 조위의 패턴으로 수치적 안정성을 확인한 후 마지막 1조석에 대하여 매 20분 간격으로 조석류를 저장하였고 마지막 한 조석에는 항류를 계산하여 생태계 모델의 입력자료로 이용하였다. Fig. 3은 진해만 해수유동의 재현 결과를 검증하기 위하여 해수유동모델의 계산결과와 장 등(1984)의 대조기 관측결과를 비교한 진해만 입구와 중앙부에서의 조류타원도이다. 마산만과 진해만 중앙수로의 자료를 비교한 결과 두 정점의 진폭과 위상이 비교적 잘 일치하고 있어 계산결과가 만내의 조류특성을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

진해만의 창조류(Fig. 4)는 가덕도 남쪽을 돌아 가덕수로와 나란한 방향으로 유입되며 진해만 서부와 마산만으로 진입하고 있다. 이때 주수로를 따라서 강하게 서북진하는 해수는 대부분은 진해만 서부해역으로 이동하여 만 중앙부에서 느리게 진동만, 원문만, 고현성만으로 이동한다. 북쪽으로 이동한 일부는 마산만과 행암만으로 나누어 유입된다. 유속의 크기를 살펴보면

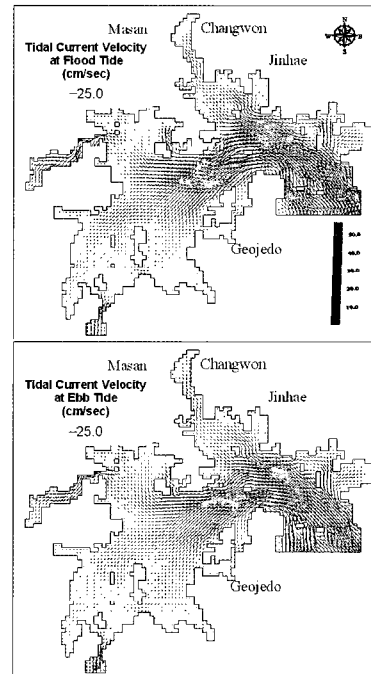


Fig. 4. Velocity field of calculated tidal currents. (top : Flood tide, bottom : Ebb current)

층별 흐름의 패턴은 표층~저층까지 거의 유사한 흐름의 형태를 나타내고 있고, 저층으로 갈수록 유속의 크기가 현저히 감소하고 있다. 낙조시의 경우에는 창조시와는 반대의 패턴이 나타나며, 일반적으로 낙조시의 유속이 더 크게 나타났다. 잔차류

의 경우, 수심경사가 급하고 유속이 강하며 외해로 열린 진해만의 중앙수로부~거제도 북단에서 가장 크게 나타났고, 수심경사가 완만하고 유속이 약한 진해만 북부해역과 서부해역에서는 약하게 나타났다. 진해만의 중앙수로부~거제도 북단에서의 표층 최대유속은 약 10~12 cm/s 내외였으나, 북부해역과 마산만 해역 부근에서의 최대 잔차유속은 5 cm/s 이하로 낮게 나타났다. 진해만 중앙부에서는 시계방향으로 회전하는 와류가 발생하였다.

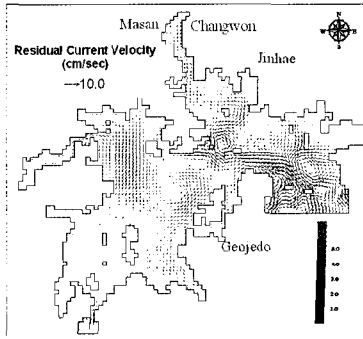


Fig. 5. Velocity field of calculated surface residual currents.

3.2 생태계 모델 재현결과

생태계 모델의 재현결과를 검증하기 위하여 수질인자인 COD와 DO를 이용하여 표층과 저층의 관측값과 계산값을 비교하였다(Fig. 6~7). 표층 COD의 경우 19개의 현장관측지점의 관측농도의 평균값은 2.73 mg/L 이었으며, 계산된 COD값은 2.79 mg/L로 나타나(Fig. 8) 상대오차는 평균 27.97%였으며, 전 비교 정점에서 비교적 양호하게 나타났다. 표층 DO의 경우는 관측값이 7.67 mg/L 이었으며, 계산값은 6.97 mg/L 로 나타나 상대오차가 9.56%로 전 비교 정점에서 양호하게 나타났다. 저층 COD의 경우 19개의 현장관측지점의 관측농도의 평균값은 2.19 mg/L 이었으며, 계산된 COD값은 1.55 mg/L 로 나타나 상대오차는 20.54%였으며, 전 비교 정점에서 비교적 양호하게 나타났다. 저층 DO의 경우는 관측 값이 1.35 mg/L 이었으며, 계산값은 1.07 mg/L 로 나타나 상대오차가 29.38%로 전 비교 정점에서 양호하게 나타났고, 특히 하계 진해만 일원에서 발생하는 빈산소 수괴 현상을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

단순회귀분석결과 실측치와 계산치의 관계정도를 나타내는 상관계수 r (correlation coefficient)은 표층 COD의 경우는 0.811, 저층 COD의 경우는 0.876 로 나타나 실측치에 대한 계산치의 상관성이 높게 재현된 것으로 나타났으며, 표층 DO의 경우는 0.856, 저층 DO의 경우는 0.817 로 나타나 실측치에 대한 계산치의 상관성이 높게 재현된 것으로 나타났다. 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수 r^2 (coefficient of determination)은 표층 COD의 경우 0.657, 저층 COD의 경우 0.767, 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났다. 또한 표층 DO의 경우 0.733, 저층 DO의 경우 0.668로 표본회귀선에 적합하게

나타났다.

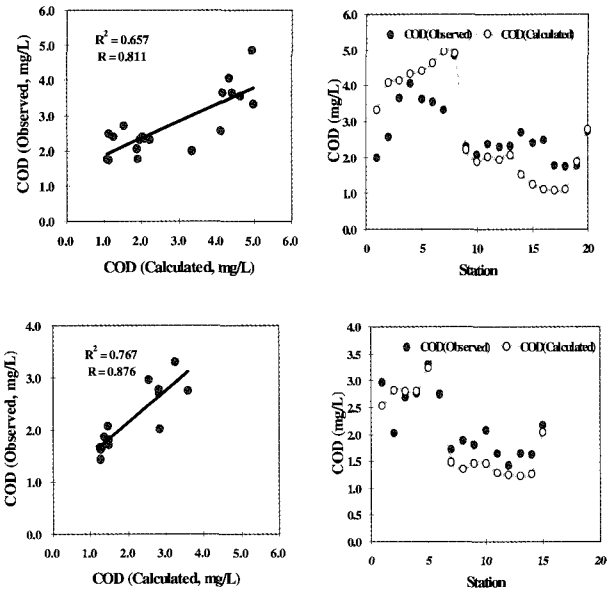


Fig. 6. Comparison of COD concentrations between the observed and the calculated in surface waters(top) and bottom waters(bottom) of Jinhae Bay.

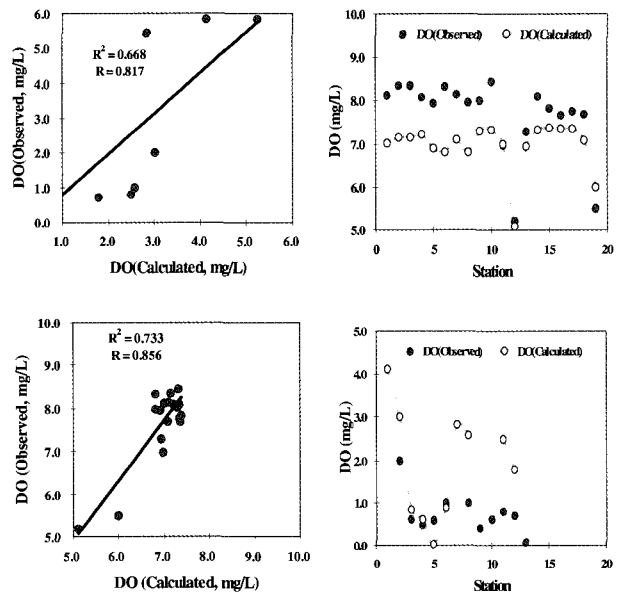


Fig. 7. Comparison of DO concentrations between the observed and the calculated in surface waters(top) and bottom waters(bottom) of Jinhae Bay.

3.3 부하삭감에 따른 수질개선효과

진해만 해역의 수질관리를 위해서 외부유입부하의 삭감이 수질에 미치는 영향을 분석하였다. 외부 부하가 없다고 가정할

경우에는 전적으로 초기조건과 경계조건에 따라 내부 생산의 순환과정의 결과로 수질이 좌우될 것이며 특히, 계산 시간이 길어질수록 경계와 평형을 이루게 될 것이다. 외부부하가 없다고 가정할 경우, 혹은 100% 외부부하를 제거했을 경우를 가정하여 분석한 결과, COD 농도는 평균 1.62 mg/L로 진해만 중앙부방향의 경계와 낙동강 하구 유역방향 및 거제도 동안방향의 경계 농도에 좌우되는 것으로 분석되며, 이는 진해만의 수질관리는 마산만 유입 부하뿐만 아니라, 남해안 외해 측과 낙동강유역을 포함하는 한국 남동해안의 수질관리와도 연계되어 보다 미묘하고 복잡하다는 것을 의미한다.

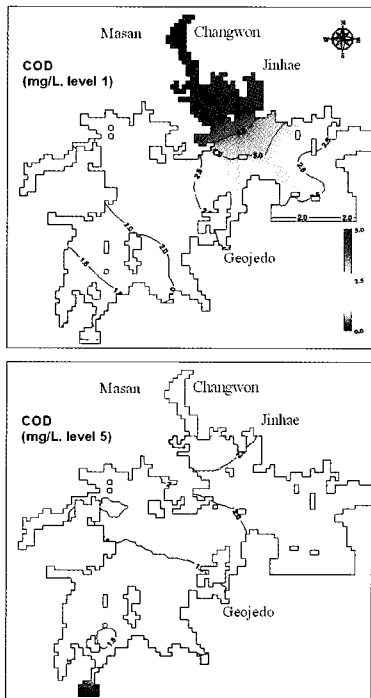


Fig. 8. The simulated results of COD on the condition of present situations.
(top: 1st level; bottom: 5nd level)

생태계 모델을 이용한 각 부하삭감 시나리오별 시뮬레이션 계획은 육상부하량만 50, 70% 삭감한다고 가정할 경우와, 유기물부하만 90%, 영양염부하만 90% 삭감한다고 가정할 경우, 그리고, 육상부하량을 제외하고 저질 용출부하만 100% 삭감한다고 가정할 경우, 육상부하와 저질 용출 부하를 각각 50% 삭감한다고 가정하는 등 9가지의 Case에 대해 각각 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 해역 II 등급인 COD 2.0 mg/L을 만족하는 경우는 육상부하를 현재의 부하량에서 70% 삭감할 경우와, 영양염 부하만 90% 삭감할 경우, 그리고, 육상부하량과 저질 용출부하를 각각 50%씩 삭감할 조건이었다.

그리하여, 수질 목표 2.0 mg/L를 만족하는 경우 중 육상의 영양염만을 90% 삭감하는 경우와 유사한 양의 영양염 삭감효과가 있도록, 진해만 저층 면적중의 15%에 해당하는 1,121 격자, 즉, 208.1 km²에서 퇴적물을 준설한다고 가정하고 퇴적물의

용출속도를 85%만 입력하여 시뮬레이션 하였다. 총 유입 DIP는 4,576 kg/day로 전체의 87.0%, DIN은 50,307 kg/day로 73.3%에 해당하는 양이다. 그러나, 수질 재현결과 COD 2.65 mg/L로 불과 5% 정도로 개선효과가 미미하였다. 이렇듯 저질 용출 부하 삭감만으로는 수질개선효과가 낮은데, 이것은 하계 진해만의 경우 강한 성층에 의해 저층에 존재하는 다량의 영양염이 표층의 식물플랑크톤에 100% 이용되기 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 저층의 부하량에 대한 유광층에서 기초생산에 대한 기여에 관해서는 향후 심도 깊은 연구가 이루어져서 이러한 관계를 명확히 할 필요가 있는데, 현재의 관측 자료로는 퇴적물의 용출과 관련하여 많은 논란의 여지가 있을 것으로 판단된다.

3.4 환경용량산정

삭감조건에 따른 모델링 결과에서 해역 수질등급 2등급인 COD 농도 2.0 mg/L을 만족하는 조건 혹은 2.0 mg/L에 가까운 조건은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 전체 육상부하량의 100% 삭감, 전체 육상부하의 70% 삭감, 유기물 부하를 제외한 영양염 유입부하의 90% 삭감, 유기물과 영양염의 100% 삭감, 저질 용출부하의 100% 삭감, 그리고, 전체 육상부하와 저질 용출부하의 50% 삭감조건이었다(Fig. 10).

그러나, 육상부하나 용출부하의 100% 혹은 90% 삭감 등은 다소 비현실적이며 극단적인 조건이기 때문에 환경용량의 산정의 고찰에서 제외하였고, 또한, 퇴적물 용출부하에 관해서는 삭감 대상의 영역에 대해서 논란의 소지가 있기 때문에 환경용량 산정은 육상부하량만을 대상으로(Table 3), ① 유기물삭감 + 영양염 삭감, ② 영양염만 삭감으로 구분하였다.

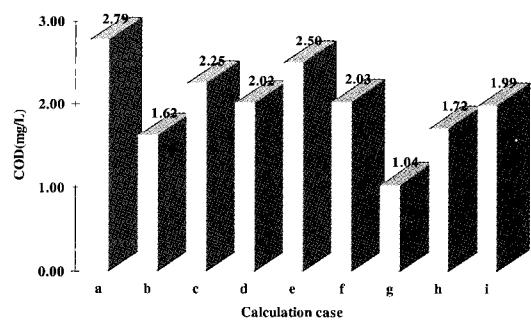


Fig. 9. Estimated effect of pollutant load reduction on COD restoration in Jinhae Bay.

(a, Present situation; b, 100% reduction of land based input loading; c, 50% reduction of land based input loading; d, 70% reduction of land based input loading; e, 90% reduction of COD of land based input loading; f, 90% reduction of land based input loading in nutrients only ; g, 100% reduction of land based input loading and sediment release nutrients; h, 100% reduction of sediment release nutrients; I, 50% reduction of land based input loading and sediment release nutrients)

수질의 화학적 산소요구량 농도를 2.0 mg/L로 유지하기 위해

각종 오염원으로부터 삭감하여야 할 오염 부하량은 유기물과 영양염을 동시에 삭감할 경우, 유기물(COD) 5,632 kg/day, 용존무기인 481 kg/day 및 용존무기질소 7,991 kg/day 이며, 이 때 해역 II등급을 유지하기 위해 마산만이 받아들일 수 있는 오염부하량의 한계 즉, 환경용량은 화학적산소요구량 부하 13,112 kg/day, 용존무기인 206 kg/day 그리고 용존무기질소 3,425 kg/day 로 산정되었다. 영양염 만을 삭감할 경우 용존무기인 618 kg/day 및 용존무기질소 10,275 kg/day 이며, 환경용량은 용존무기인 69 kg/day 그리고 용존무기질소 1,141 kg/day로 계산되었다.

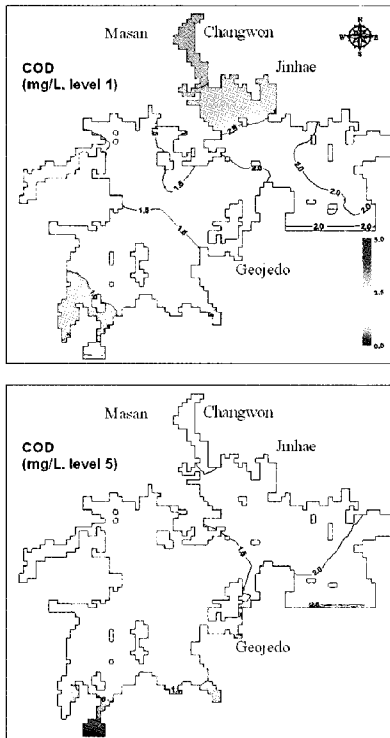


Fig. 10. The simulated results of COD at 50% reduction of land based input loading and sediment release nutrients (top: 1st level; bottom: 5nd level).

Table 3. The estimated Carrying capacity of Jinhae bay

Present load to Jinhae bay		Pollutant load to reduce	Carrying capacity
COD, kg/day	18,774	5,632*	13,112*
DIP, kg/day	687	481*	206*
		618**	69**
DIN, kg/day	11,416	7,991*	3,425*
		10,275**	1,141**

* : in case of reduction of both the COD and nutrients

** : in case of reduction of nutrients only

4. 결론

생태계 모델결과 진해만 전 해역을 목표수질인 COD 농도 2.0 mg/L을 만족하는 조건은 전체 육상부하의 70~90%를 삭감하거나, 전체 육상부하와 저질 용출부하의 50%를 동시에 삭감하여야 하는 것으로 나타났다. 환경용량 산정은 육상부하량만을 대상으로 고려하였으며, 유기물과 영양염을 동시에 삭감할 경우, 유기물 (COD) 5,632 kg/day, 용존무기인 481 kg/day 및 용존무기질소 7,991 kg/day 이며, 이 때 해역 II등급을 유지하기 위해 마산만이 받아들일 수 있는 오염부하량의 한계 즉, 환경용량은 화학적산소요구량 부하 13,112 kg/day, 용존무기인 206 kg/day 그리고 용존무기질소 3,425 kg/day 라고 할 수 있다. 영양염 만을 삭감할 경우 용존무기인 618kg/day 및 용존무기질소 10,275 kg/day 이며, 환경용량은 용존무기인 69 kg/day 그리고 용존무기질소 1,141 kg/day 라고 할 수 있다. 이는 외부 유입 부하가 진해만의 자정능력을 초과하여 유입되고 있으며, 환경용량을 초과하는 오염부하에 대해서는 적용 가능한 삭감계획을 수립하여야 한다는 것을 의미한다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장환경용량산정연구, RP-2007-ME-025)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 김광수(1995), 생태계모델을 이용한 황해의 환경용량 산정. 부산수산대학교 박사학위논문. pp. 125
- [2] 김광수, 김동명, 박청길(1999), 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략 산정, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Vol. 2, No. 1, pp. 63-73.
- [3] 김광수, 박청길, 조은일(1996), 생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, Journal of Korean Society on Water Quality Vol. 12, No. 4, pp. 383-399.
- [4] 김중구, 박청길, 김광수(1994), 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용, 한국환경과학회지 3(3), pp. 185-195.
- [5] 장선덕, 이문옥, 김종화, 박광순, 김복기, 임기봉(1984), 진해만 동부해역의 해수유동. 수과원 연구보고, Vol. 32, pp. 7-23.
- [6] 최우정, 박청길, 이석모(1994), 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험. 한국수산학회지, Vol. 27, No. 4, pp. 413-433.
- [7] 해양수산부(2002), 연안어장 환경 평가 보고서, pp. 15-25.
- [8] 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, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 22, No. 2, pp. 96-108.
- [9] 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, No. II-13, pp. 21-23.

- [10] Cloern, J.E.(2001), Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 210, pp. 223-253.
- [11] Cognetti, G.(2001), Marine eutrophication: the need for a new indicator system. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 42, pp. 163-164.
- [12] Kremer, J. and S.Nixon(1978), A coastal marine ecosystem: Simulation and analysis, Springer-Verlag, pp. 16.
- [13] Lung, W. S.(1988), The role of estuarine modeling in nutrient control. *Water Science and Technology* Vol. 20, pp. 243 - 252.
- [14] Mark, D.J., Bunch, B.W.(1992), Hydrodynamic and water quality modeling of Lower Green Bay. Estuarine and coastal modeling, In: *Proceedings of the Second International Conference, ASCE 1992*, pp. 657 - 668.
- [15] Ménesguen A.(1990), Eutrophication along the French coasts. In *Eutrophication-related Phenomena in the Adriatic Sea and in other Mediterranean Coastal Zones* (Barth, H. & Fegan, L., eds). *Water Pollution Report No.16*, pp. 63-82.
- [16] Nixon, S.W.(1995), Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, Vol. 41, pp. 199-219.
- [17] Okaichi, T.(1985), The Cause of red-tide in Neritic Waters, *Japan Fisheries Resources Conversation Association*, pp. 58-75.
- [18] Takeshi, H.(1988), The role of modelling in the control of seawater pollution. *Water Science and Technology* Vol. 20, pp. 277 - 286.
- [19] Takeoka, H., Murao, H.(1997), Response of water quality to the reduction of nitrogen or phosphorus load from the land. *Bulletin on Coastal Oceanography* Vol. 34, pp. 183 - 190.

원고접수일 : 2007 년 6월 10 일

원고채택일 : 2007 년 6월 27 일