

생태계 모델을 이용한 울산만의 하계 수질관리

박성은* · 홍석진**† · 이원찬** · 정래홍** · 조운식** · 김형철** · 김동명***

*, ** 국립수산물과학원 환경연구과, *** 부경대학교 생태공학과

Summer Water Quality Management by Ecological Modelling in Ulsan Bay

Sung-Eun Park* · Sok-Jin Hong**† · Won-Chan Lee** · Rae-Hong Jung**

Yoon-Sik Cho** · Hyung-Chul Kim** · Dong-Myung Kim***

*, ** Division of Environmental Research, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea

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

요 약 : 울산만의 육상기인 오염부하에 대한 해역수질의 응답특성을 조사하고 만내 수질관리에 활용하기 위하여 해양생태계모델링 연구를 수행하였다. 생태계모델에 의해 계산된 울산만의 수질은 만 내측에서 COD 농도 2.8mg/L로 해양수질 III등급 수준으로 나타났다. 계산결과 울산만 전체 해역의 수질을 II등급으로 개선하기 위해서는 육상부하를 약 30% 이상 삭감해야 하며, COD 농도 1.0mg/L이하의 수질이 되기 위해서는 전체 육상부하의 70% 이상을 삭감해야 하는 것으로 나타났다. 해역수질 II등급을 유지하기 위하여 삭감해야 할 오염부하량은 약 3,083kgCOD/day, 이 때의 환경용량은 약 7,193kgCOD/day로 계산되었다. 태화강 하구역은 식물플랑크톤 대증식(Bloom)이 상습적으로 발생하는 해역이므로 식물플랑크톤에 의한 자생유기물 부하를 감소시키기 위해서는 유기물 삭감 이외에도 영양염의 제어가 필요한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 육상기인 오염부하, 생태계 모델, 해역수질 응답특성, 환경용량, COD, 수질관리, 울산만

Abstract : Numerical study on coastal water quality management was conducted to examine the response of summer water quality to the flow into the sea of land based pollution load in Ulsan Bay, Korea. The abatement of pollution load from point sources of land was estimated on the basis of Korean coastal water quality standard using an ecosystem model. The results of the ecological model simulation showed that COD values in the inner part of the bay were greater than 2.80mg/L, and exceeded the grade III limit of Korean coastal water quality standard. 30% of all land based pollution loads or organic and inorganic material loads from point sources should be cut down to keep the COD levels below 2mg/L. As environmental carrying capacity was estimated to be 7,193kgCOD/day to keep the COD levels below 2mg/L in Ulsan Bay, 3,083kgCOD/day of land based organic loads should be reduced. The phytoplankton blooms have occurred in the Teahwa river mouth or estuary repetitively, so it is important to control land based nutrients loads for removal of autochthonous organic loads around Ulsan Bay.

Key Words : Land based pollution load, Ecosystem model, Response analysis of water quality, Environmental carrying capacity, COD, Water quality management, Ulsan Bay

1. 서 론

울산만 내측 깊숙이 자리 잡고 있는 울산항은 울산공업단지의 원료·제품을 원활히 수송하기 위해 조성된 항구로 내수면적이 약 1,100만㎡에 달한다. 죽도 북서쪽에 위치하는 장생포항은 폭이 200~400m 정도로 협소하지만 수심이 깊고, 일찍부터 고래잡이 어업의 근거지로 유명하며, 화암추 북동쪽 약 1.8km 지

점에는 방어진항이 있다. 울산만 지역은 옛날부터 어업이 성하여 일찍부터 동해안의 양항으로 발달한 장생포항과 방어진항을 중심으로 하는 경남지역의 수산업 중심지였다. 그러나 울산공업단지가 들어서면서부터 수산업이 쇠퇴하고 공업항으로 탈바꿈하게 되었으며 만 일대는 공장지대에서 흘러나오는 폐수로 인한 오염으로 적조현상이 자주 발생하여 이 지역 수산업에 큰 피해를 입혔다.

2000년 2월 특별관리해역으로 지정되어 환경개선을 위해 노력이 시도된 이후로 적조 발생회수는 급격하게 감소하는 추세

* 대표저자 : 정희원, separk@nfrdi.go.kr, 051-720-2525

† 교신저자 : 정희원, sj@nfrdi.go.kr, 051-720-2522

이며, 울산연안 특별관리해역은 현재 COD 기준 II~III 등급 수준을 유지하고 있으나, 태화강 하구의 적조발생과 수산자원 폐사 등이 우려되고 있으며, 특히 산업 단지에서 배출하는 중금속, 내분비계장애물질 등의 오염물질이 해역으로 유입할 가능성이 큰 지역이다. 지난 1997년부터 약 2,900 여억원의 예산이 투입되어 태화강 수질개선을 위한 환경개선사업을 시행하는 등 적극적인 환경개선 투자로 태화강의 수질이 개선되고 있고, 연어가 회귀하는 등 부분적으로 생태적 복원 효과가 나타나고 있으나, 수질환경이 전반적으로 개선되고 있음에도 불구하고 외항강 하구의 수질환경 개선정도는 크지 않을 뿐만 아니라 유해화학물질과 중금속에 의한 퇴적물 오염이 예상된다. 이에 울산연안해역의 환경문제에 대하여 보다 적극적으로 대응하기 위해, 해역의 오염원 종류와 분포 특성, 사회경제적 여건 등을 분석하여 종합적인 환경관리 계획을 수립함으로써 해역의 환경개선의 효과를 극대화해야 한다(국토해양부, 2008).

해역의 수질을 합리적으로 관리하려면 수질 특성을 파악하기 위한 현장조사를 실시하고, 수질 자료에 근거한 수질 시뮬레이션을 통하여 장래의 수질을 예측함과 동시에 대상해역의 환경용량을 파악함으로써 유입오염부하를 해역의 자정능력범위 내로 삭감하는 등 수질관리 방안을 강구해야 한다. 연안해역의 수질을 개선하기 위해서는 해역 자체가 지닌 자정능적인 환경용량에 적합하도록 육상에서 유입되는 오염물질을 조절하는 것이 중요하며, 해역의 용도에 적합한 수질을 유지하기 위해서는 대상해역이 악영향을 받지 않고 수용할 수 있는 최대의 오염부하량으로 정의되는 환경용량(홍 등, 2007)의 범위내로 유입부하의 총량을 규제할 필요가 있다. 자정능력의 한계로 표현되는 환경용량은 수질 시뮬레이션을 이용하여 산정이 가능하며 이를 위해서는 수치모델이 유용한 도구이다. 최근에는 생태유체역학 모델(Eco-hydrodynamic model)이 많이 사용되고 있으며, 국내·외 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 and Bunch, 1992; Takeoka and Murao, 1997; 김 등, 1996; 김 등, 1999). 특히 생태계에 대한 총괄적인 접근을 위해서는 해역 내에서 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 질소 및 인의 순환을 포함한 생태학적 관련인자의 관계를 포함한 생태계 모델의 이용이 필수 불가결하다(홍 등, 2007). 따라서, 본 연구는 생태계 모델을 이용하여 태화강 유역의 수질 개선을 통한 육상부하로부터의 울산만 해역의 수질 응답 특성을 재현하고, 수질개선을 위해 목표수질을 COD 수질 2 mg/L로 설정하고 이를 달성하기 위한 육상오염 부하량의 삭감량을 산정하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 해역 수질조사 및 육상 부하량 조사

울산만의 수질을 조사하기 위하여 2008년 8월 Fig. 1에 표시

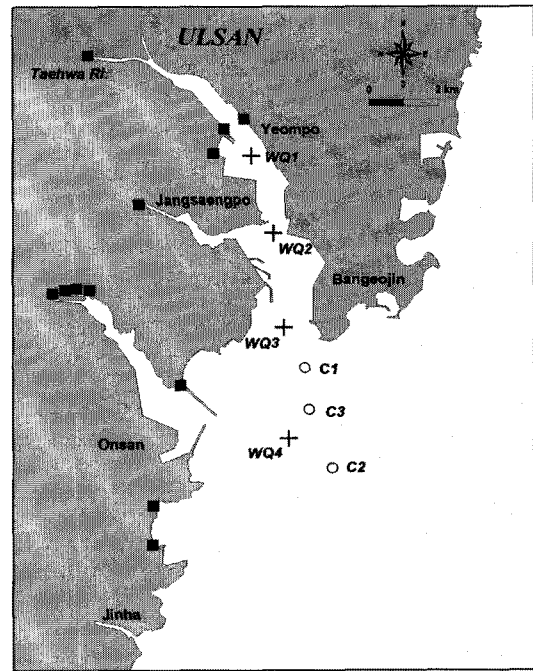


Fig. 1. Station map for pollution sources(■, load input), seawater(+, calibration) and site of tidal current comparison(○, C1~C3) in Ulsan Bay.

된 4개의 정점(WQ1~WQ4)에서 Niskin 채수기를 이용하여 표층 및 저층 해수를 채수하여 분석하였다. 수온, 염분, 용존산소는 현장관측하였고(YSI 6000, CTD), 화학적 산소요구량(COD)은 알칼리성 과망간산 칼륨법으로, 암모니아 질소(NH₃-N), 아질산 질소(NO²-N), 질산 질소(NO³-N), 인산 인(PO₄³-P) 및 클로로필 a(Chl.a)는 해양환경공정시험방법(국토해양부, 2005)에 의해 비색정량하였다.

울산만 해역으로 유입되는 5개 정점을 포함하는 총 12개 정점에 대해 유량을 2008년 8월에 측정함과 동시에 시수를 채수한 후, 실험실로 신속히 운반하여 수온, pH, 용존산소, 화학적 산소요구량, 부유물질, 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소, 인산인에 대하여 분석하였다. 그리고 각 유입 지점의 유량과 수질분석 자료를 이용하여 오염부하량을 산정하였다. 그러나 대기로부터의 오염부하 및 지하수 유입부하는 고려하지 않았다.

2.2 생태계 모델의 개요

생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)은 해수유동 모델과 생태계 모델로 구성되어 있다. 해수유동모델은 POM(Blumberg and Mellor, 1987)을 이용하여 조석류와 조석잔차류를 계산하였다. POM은 유한차분법을 이용하여 원시운동방정식의 해를 구하는 모델로 자유표면의 시공간적인 변동계산이 가능하므로 개방경계에서 조석강제력을 고려할 수 있어 하구 및 연안역에 많이 적용된다(Oey and Mellor, 1993). 그 특징을 보면 연직혼합계수를 산정하기 위하여 2차 난류종결모델(Second moment

turbulence closure model)을 사용하고 있으며 연직좌표를 수심에 대한 비율로 분해하는 시그마(σ) 좌표계를 도입하고 있다. 또 계산시간의 효율성을 고려하여 증력파를 계산할 때 외부 및 내부모드로 시간스텝을 분리해서 계산하는 모드분리기법을 도입하고 있다. 하천을 포함한 육상 유입원으로부터 모델 해역으로 유입하는 유량은 8월에 조사한 하계의 유량을 적용하였으며, 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 주기의 조석류를 한 조석 주기로 평균한 항류를 잔차류로 하여 수질 예측을 위한 생태계 시뮬레이션에 이용하였다.

본 연구에서 생태계 모델로는 마산만 특별관리해역의 수질관리를 위한 마산만 연안오염총량관리에서의 환형용량 산정을 위해 만들어진 연안 수질관리 모델인 EM3(Ecological Model for Marine environmental Management)을 이용하였다(국토해양부, 2008). EM3는 부영양화가 현안문제로 논의되고 있는 국내 연안환경의 관리에 적합하도록 연구 개량되어 그 적용성이 검토되고 있으며, 향후 국내 연안 해역에서 기초생산생태계와 환경용량산정에 이용도가 높다. 본 모델에서는 기본적으로 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기물질 즉, 유기체설물(Detritus), 용존유기물질(DOM), 영양염(Nutrients) 및 수질인자로 이루어져 있다.

식물플랑크톤은 규조류 2종과 와편모조류 1종으로 구성하였으나, 동물플랑크톤이나 시스템 내의 다른 종에 대해서도 마찬가지로 해역의 특성이나 연구의 목적에 따라 원하는 대로 종의 추가 혹은 생략이 가능하다. 영양염 항목은 수층과 퇴적물과의 상호작용을 고려하기 위해 수층과 퇴적물층 내의 영양염으로 구분하였고, 기본적으로 인산인, 규산규소, 암모니아 질소, 질산 질소로 구분하였다. 수질인자는 용존산소와 함께 해역의 수질등급을 구분하며, 산소를 소비하는 유기물질의 양을 간접적으로 나타내는 COD 항목으로 표현되도록 하였으며, COD 값은 시스템 외부와의 유·출입에 의한 증감은 물론 식물플랑크톤의 증식에 의한 자생 COD 즉 내부생산 COD도 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 해양생태계 내의 각 구성요소들 사이에 질소(N), 인(P) 및 산소(O₂)의 생화학적인 순환 과정을 수식화 하였다(Fig. 2). 또한, 본 모델은 영양염의 이동경로를 쉽게 파악할 수 있고 해역의 부영양화현상과 관련된 제과정의 이해와 그들의 제어를 위한 목적으로도 충분히 이용 가능하다.

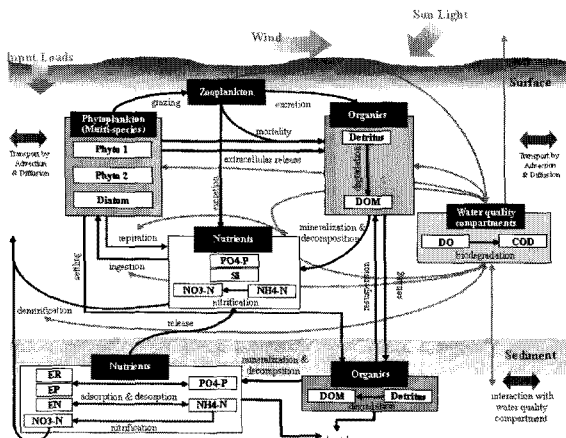


Fig. 2. The schematic diagram of ecosystem model EM3.

생태계 모델의 구조를 간단히 요약하면, 생태계 내 물질의 보존을 나타내는 미분방정식은 순환경로의 하나하나가 실험이나 관측 사실로부터 유도된 경험식에 따르고 있고, 메카니즘에 있어도 유체역학 모델과 같은 물리 법칙에 근거한 모델과는 성격이 다른데, 해역의 임의 지점에 있어 구성요소의 현존량 (B)의 시간에 따른 농도변화는 식(1)과 같은 확산방정식에 의해서 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right] + \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

여기서, x, y, z는 좌표변수이며, t는 시간을, u, v, w는 x, y, z방향의 유속성분을 나타내고 있다. 또한, K_x, K_y, K_z는 x, y, z방향의 와동확산계수를 나타내며, B는 구성요소의 현존량 (또는 농도)를, dB/dt는 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 구성요소의 변화량을 의미한다. 생태계에서는 동·식물플랑크톤, 현탁태 및 용존유기물의 거동을 알면 COD의 단위시간당 변화량을 알 수 있다. 따라서 각 형태별 유기물의 변화량을 수식화 하면 식(2)와 같다.

$$\frac{dCOD}{dt} = [COD : C_p] \frac{dP}{dt} + [COD : C_z] \frac{dZ}{dt} + [COD : C_{POM}] \frac{dPOC}{dt} + [COD : C_{DOM}] \frac{dDOC}{dt} \quad (2)$$

2.3 모델 입력자료

모델 영역(Fig. 1)은 북쪽으로 태화강 상류를 포함하여 기타 울산만으로 육상기인오염물질을 유입시키는 하천 및 공단 배출구들이 모두 포함되도록 설정하였으며 남쪽으로는 진해해수욕장까지 포함시켜 x, y 방향으로 각각 13.6×12.8km에 이르는 영역을 설정하였다. 격자구성은 울산만을 중심으로 최소 격자 200m를 배치하여 최대 800m 격자까지 가변격자체계를 사용하였으며 이때 총 격자수는 x, y 방향으로 각각 93×126개였다.

총 계산시간은 18일로 해가 안정화된 3일 후의 15일 자료를 사용하여 조석잔차류를 구하고 이것을 생태계모델의 입력자료로 이용하였다. 수층은 총 5개의 시그마층으로 구분하였다. 울산만 외해역의 경우 해류의 영향이 비교적 크게 작용하나 연안역에 인접한 유동은 연중 가장 안정한 조류이므로 해수 유동을 재현하기 위한 외해경계값은 경계의 각 격자점에서 매 시간 간격마다 주위 4대 분조(M₂, S₂, O₁, K₁)의 조화상수를 적절히 선형보간하여 조위값을 부여하였다. 지형 및 수심은 해도 No. 119, No. 119A를 사용하였다. 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙하였고 여름철에 바람이 없는 빈도수가 높아 모델에서는 바람의 영향을 고려하지 않았다. 수온과 염분은 2003년 국립수산과학원의 현장관측 자료를 이용하여 각 층별로 적절한 값을 입력하였다. 1~5 층에서 수온은 23.0~24.0℃, 염분은 28.4~29.0psu

Table 1. The biological parameters used in the ecosystem model

| Symbol | Definition | Unit | Used values |
|-------------------------|--|-------------------------|-------------|
| α_1 | maximum growth rate of phytoplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.55 |
| α_2 | respiration rate of phytoplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.10 |
| α_3 | maximum grazing rate of zooplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.18 |
| α_4 | death rate of phytoplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.01 |
| α_5 | natural death rate of zooplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.054 |
| α_6 | mineralization rate of POC at 0°C | day ⁻¹ | 0.012 |
| α_7 | mineralization rate of DOC at 0°C | day ⁻¹ | 0.005 |
| α_8 | oxygen consumption rate of sediment at 0°C | day ⁻¹ | 1.000 |
| K_{SP} | half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ -P at 0°C | μg-at · L ⁻¹ | 0.30 |
| K_{SN} | half saturation constant for uptake of DIN at 0°C | μg-at · L ⁻¹ | 3.00 |
| I_{opt} | optimum intensity of radiation for photosynthesis | ly · L ⁻¹ | 200.0 |
| I_{max} | maximum intensity of sunlight at sea surface | ly · L ⁻¹ | 856.0 |
| k_0 | dissipation coefficient of light independent of Chl.a | m ⁻¹ | 0.57 |
| P^* | function of grazing | mg C · m ⁻³ | 75 |
| μ | digestion efficiency of zooplankton | % | 70 |
| λ | total growth efficiency of zooplankton | % | 30 |
| κ | percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC | % | 25 |
| K_{DO}^1 | half concentration of DO for mineralization of POC | mg · L ⁻¹ | 1.0 |
| K_{DO}^2 | half concentration of DO for mineralization of DOC | mg · L ⁻¹ | 1.0 |
| W_P | settling velocity of phytoplankton | m · day ⁻¹ | 0.17 |
| W_{POC} | settling velocity of detritus(POC) | m · day ⁻¹ | 0.43 |
| [COD:C _P] | ratio of COD/C for phytoplankton | - | 3.41E-04 |
| [COD:C _Z] | ratio of COD/C for zooplankton | - | 1.51E-03 |
| [COD:C _{POM}] | ratio of COD/C for detritus(POC) | - | 1.33E-03 |
| [COD:C _{DOM}] | ratio of COD/C for DOC | - | 1.12E-03 |
| K_a | reaeration coefficient at sea surface | day ⁻¹ | 0.15 |

의 값을 적용하였다. 해저마찰계수는 일반적으로 해의 안정성을 고려하여 $k=0.0025$ 를 적용하였다. Coriolis parameter가 위도에 따라 일정한 F-plane을 사용하였다. 육상의 하천을 통하여 모델 해역으로 유입하는 하천유량은 국립수산과학원에서 현장 관측한 8월의 자료를 적용하였다. 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 초기농도와 개방경계에서의 농도는 관측결과를 위주로 입력되 적절히 조절하여 사용하였다. 생태계모델의 시뮬레이션에 이용한 생물학적 Parameter는 본 연구에서 직접 조사하지는 않았고, 기존의 국내 연안 생태계 모델링연구에 이용되었던 자료 및 문헌 조사 결과를 기초로 울산만의 해양학적 특성을 고려하여 선정하였으며, 검 · 보정을 수행하였다(Table 1).

울산만으로 유입되는 COD 부하량은 약 10.3 ton/day 로 나타났는데(Fig. 3), 비교를 위해서 온산 공단 및 석화공단 그리고, 관심영역 외부로 유출되는 온산 하수처리장 및 용연하수처리장을 같이 나타내었다. 이는 진해만(홍 등, 2007)의 약 20 ton/day 에 비해 작지만, 유역이나 유입 해역 등과 비교할 경우 매우 크다고 볼 수 있다. 또한, 태화강과 동천강에서 합류되는 부하량이 전체의 68.3%에 해당하고 예년에 비해 강우량이 매우 작았기 때문에, 유역의 강우량이 증가한다면, 태와강과 동천강으로부터의 유기물 부하가 급증할 것으로 판단된다. TN과 TP의 부하량

은 각각 2.3 ton/day와 0.1 ton/day 수준으로 다소 높으며, 태화강과 동천강에 의한 부하가 TN 및 TP 부하량의 53.9% 및 45.9%를 차지하고 있다

3. Model 수행결과

3.1 해수 유동 재현결과

생태계 모델의 유동장 입력자료로 이용하기 위해 울산만의 해수흐름을 해수유동모델로 재현하였다.

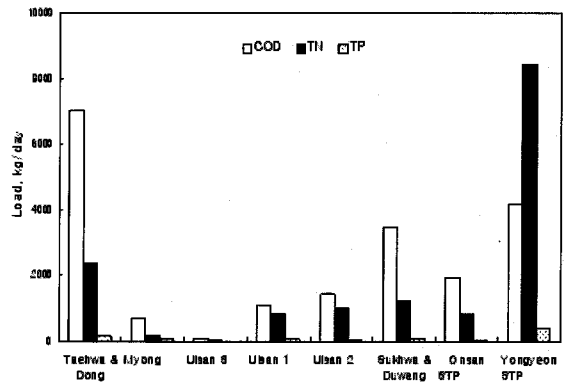


Fig. 3. Land based pollution load to Ulsan Bay in Aug. 2008.

Table 2. Comparison between calculated and observed semi-diurnal currents (C1 and C2)

| St. | Tide | Observed | | Calculated | |
|-----|-------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| | | Velocity (cm/s) | Direction (°) | Velocity (cm/s) | Direction (°) |
| C1 | Flood | 35.7 | 244 | 37.7 | 240 |
| | Ebb | 51.0 | 76 | 49.2 | 81 |
| C2 | Flood | 56.1 | 193 | 52.1 | 180 |
| | Ebb | 81.6 | 18 | 77.9 | 23 |

총 계산시간은 18일로 해가 안정화된 3일 후의 15일 자료를 사용하여 조석간차류(Fig. 6)를 구하고 이것을 생태계모델의 입력자료로 이용하였다. 해수유동 수치실험의 재현성을 검토하기 위한 조류관측 정점도를 Fig. 1에 나타내었다. C1 및 C2 정점은 국립해양조사원(2002)에서 2001년 6월 5일부터 6월 6일까지 25시간 관측한 정점이며 C3 정점은 김(1998)의 관측치를 비교한 정점이다. C1 및 C2 정점에 대한 창낙조시 최강유속을 Table 2와 같이 비교하고 C3 정점에 대해서는 Fig. 4와 같이 반일주조의 조류타원을 계산치와 비교함으로써 조류의 재현성을 검토하였다. 그 결과 유속의 진폭이 다소 차이를 보이나 주축 방향의 진폭은 거의 유사하여 본 연구에서 해수유동 수치실험의 재현성은 양호한 것으로 판단된다.

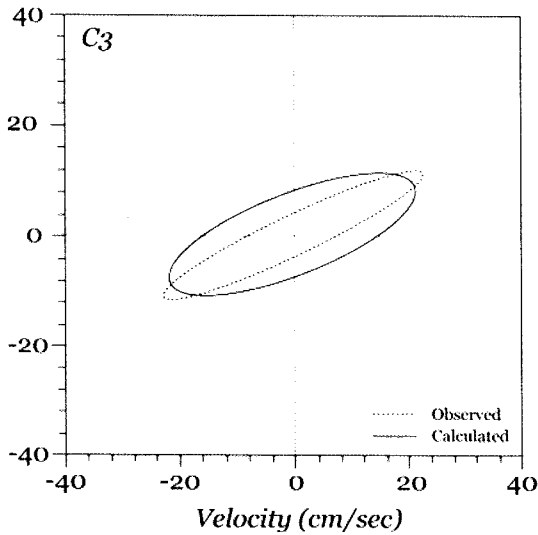
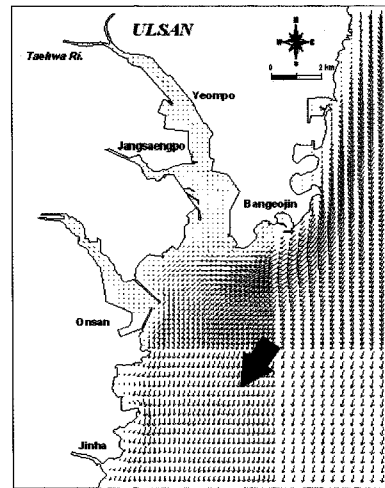


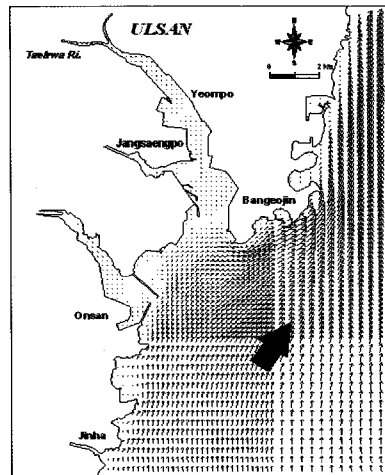
Fig. 4. Comparison of surface M_2 tidal ellipses between model calculation (solid line) and current meter observations (dotted line) on inlet of Ulsan Bay (C3).

울산만에 대한 해수유동 실험결과 대조기 최강 창·낙조 시 표층의 유속벡터도를 Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)에 각각 나타내었다. 붉은 화살표는 흐름의 주방향을 표시한 것이다. 울산만 주변 해역의 창조류 유형은 남남서~서남서, 낙조류는 북~동북동류가 우세하다.

창조류는 울산만 북동측 해역에서 남향하여 방어진을 지나 울산만 입구로 유입되며 울산만 입구 주변해역에서 대부분 서향한 뒤 일부는 울산만 내측으로 진입하나 대부분 온산만 입구를 지나 진하방향인 남쪽으로 빠져 나간다. 낙조 시에는 창조와 반대유향으로 남쪽에서 북동진하는 흐름이 주로 형성되면서 울산만 남측에서 동진하여 방어진을 지나 북동쪽으로 흐른다. 최강창조 시 유속크기는 방어진 동측 해역에서 약 50~70cm/s 범위로 울산만 남부를 향해 흐르다가 수심이 얕아지기 시작하는 울산만 입구부터 약 10cm/s 이하로 유속이 현저히 감소하며 울산만 내측의 유속은 5cm/s 전후로 미약하게 나타난다. 최강낙조 시 유속의 크기는 최강창조 시와 유사하며 유향은 반대로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 5. Horizontal tidal current vectors. (a) Max. flood flow, (b) Max. ebb flow.

삭감조건에 따른 모델링 결과에서 해역 수질등급 2등급인 COD 농도 2.0 mg/L을 만족하는 조건 혹은 2.0 mg/L에 가까운 조건은 전체 육상부하량의 30% 이상을 삭감할 경우이며, 수질등급 1등급인 COD 농도 1.0 mg/L을 만족하는 조건은 전체 육상 부하량의 70% 이상을 삭감해야하는 것으로 나타났다(Fig. 9).

삭감 시나리오별로 해역의 초기농도에 대한 삭감 후 농도의 비로 계산한 해역수질의 개선효율은 점차적으로 나빠져서, 70% 삭감의 경우에 65% 수준으로 나타난다.

부하량삭감 조건별 해역 수질(COD 농도)의 응답을 살펴보면, 10%의 육상부하량 삭감의 경우에는 울산만 전체에서 COD가 높게 존재하고 있으나(Fig. 10), 30% 삭감 시에는 대화강 유입부에서 고농도로 나타나면, 전체적으로 양호해지는 양상을 볼 수 있다(Fig. 11). 삭감 부하량이 50%를 넘어 갈 경우에는 만 전체적으로 양호한 수질을 보이며(Fig. 12), 70% 이상이 되면서 I 등급에 가까운 수질을 보이게 된다(Fig. 13).

수질의 화학적 산소요구량 농도를 2.0 mg/L로 유지하기 위해 각종 오염원으로부터 삭감하여야 할 오염 부하량은 유기물(COD) 3,083 kg/day으로 계산되었다(Table 3).

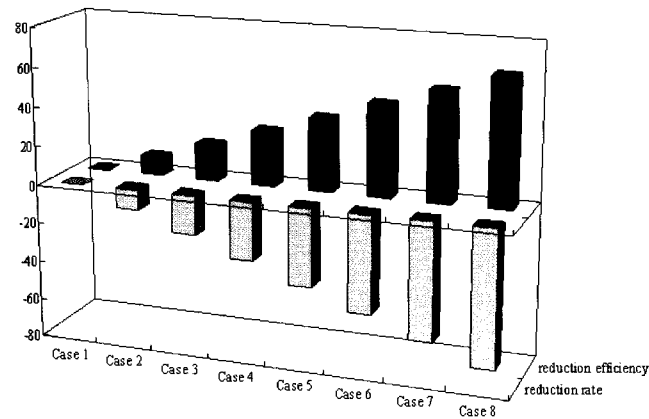


Fig. 9. Estimated effect of pollutant load reduction on COD restoration in Ulsan Bay.

Table 3. The estimated carrying capacity of Ulsan Bay

| | Present load to Ulsan Bay | Pollutant load to reduce | Carrying capacity |
|--------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| COD (kg/day) | 10,276 | 3,083 | 7,193 |

이 때 해역 II등급을 유지하기 위해 울산만이 받아들일 수 있는 오염부하량의 한계 즉, 환경용량은 화학적산소요구량 부하 7,193kg/day으로 나타났다. 이상의 결과에서 울산만은 해수유통이 원활하고 물질 체류시간이 짧음에도 불구하고, I 등급 수준의 수질을 얻기 위해서는 육상유기물 부하 70%를 삭감해야 한다는 결과를 얻었다. 육상부하의 70%이상을 삭감하는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이다. 그런데, 조사기간 동안의 울산만에서의 COD와 식물플랑크톤 생체량 및 COD와 DIN의 상관관계가 매우 높게 나타나고 있는데(Fig. 14), 이것은 울산만해역의 COD가 육상기인 유기물질의 유입 뿐만 아니라, 영양염 유입에 따른 자생 COD의 증가와도 관련이 깊다는 것을 의미한다. 따라서, 차후의 연구에 있어서는 유기물 유입에 관해서 뿐만 아니라, 영양염의 유입억제에 관해서도 깊은 고찰이 필요하다고 판단된다.

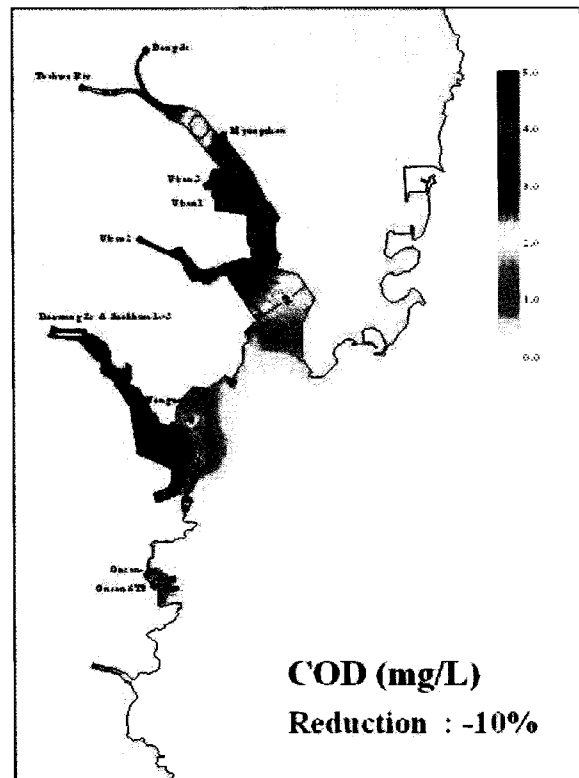


Fig. 10. The simulated results of COD at 10% reduction of input land based load.

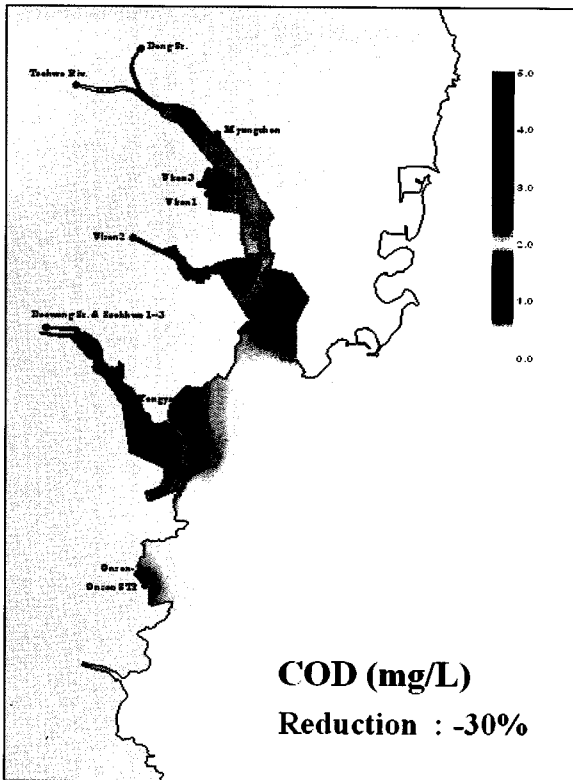


Fig. 11. The simulated results of COD at 30% reduction of input land based load.

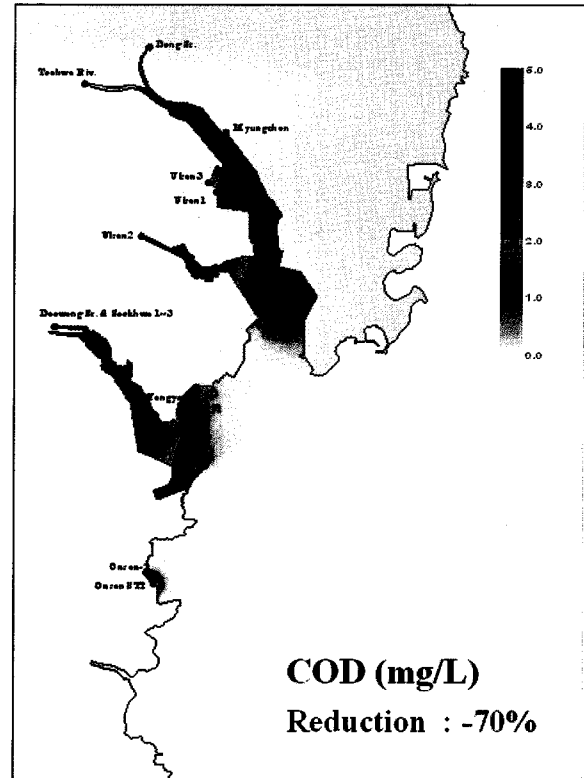


Fig. 13. The simulated results of COD at 70% reduction of input land based load.

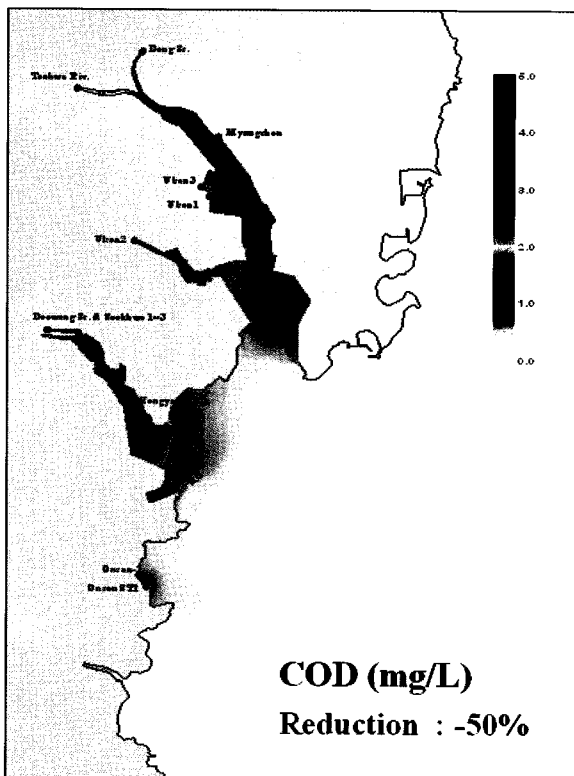


Fig. 12. The simulated results of COD at 50% reduction of input land based load.

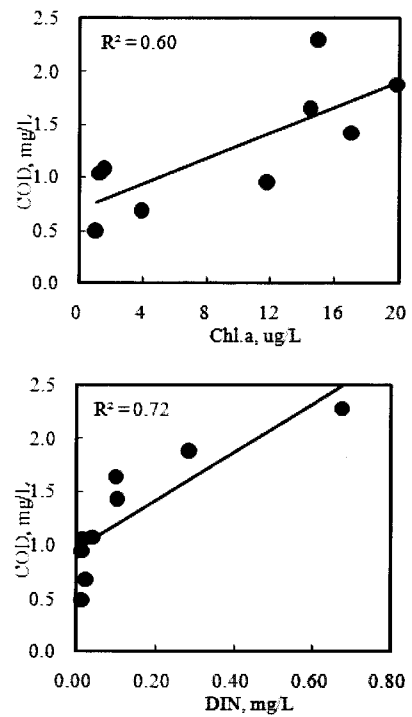


Fig. 14. Comparison of observed data (COD vs Chl.a and COD vs DIN).

4. 결 론

울산만의 육상기인 오염부하에 대한 해역수질의 응답특성을 조사하고 만내 수질관리에 모델결과를 활용하기 위하여 생태계 모델을 수행하였다. 모델 계산 결과 울산만 전체 해역을 목표수질인 COD 농도 2.0mg/L로 만들기 위한 조건은 전체 육상 부하의 30% 이상을 삭감하여야 하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 환경용량 산정은 오직 육상부하만을 대상으로 고려한 것으로 해역 II등급을 유지하기 위하여 울산만이 받아들일 수 있는 오염부하량의 한계 즉, 환경용량은 화학적산소요구량 부하 7,193 kg/day 으로 계산되었다. 이러한 결과는 외부 유입 부하가 울산만의 자정능력을 초과하여 유입되고 있으며, 환경용량을 초과하는 오염부하에 대해서는 적용 가능한 삭감계획을 수립하여야 한다는 것을 시사하고 있다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장환경용량산정연구, RP-2009-ME-056)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 국토해양부(2005), 해양환경공정시험방법, p. 314.
 [2] 국토해양부(2008), 해역환경관리 기본계획수립연구(울산만 특별관리해역), p. 334.
 [3] 국립해양조사원(2002), 수로기술연보, p.423.
 [4] 김광수(1998), 생태계모델을 이용한 울산만의 수질 시뮬레이션, 한국항만공학회지, 제12권 2호, pp. 1-9.
 [5] 김광수, 김동명, 박정길(1999), 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략 산정, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Vol. 2, No. 1, pp. 63-73.
 [6] 김광수, 박정길, 조은일(1996), 생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, Journal of Korean Society on Water Quality Vol. 12, No. 4, pp. 383-399.
 [7] 홍석진, 이원찬, 정래홍, 오현택, 장주형, 구준호, 김동명(2007), 2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링, 해양환경안전학회지, 제13권, 제2호, pp. 103-110.
 [8] Blumberg, A. F. and G. L. Mellor(1987). "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model." In: N. Heaps, Editor, Three-Dimensional Coastal Ocean Models, American Geophysical Union, p. 208.
 [9] Lung, W. S.(1988), The role of estuarine modeling in nutrient control. Water Science and Technology Vol. 20, pp. 243 - 252.
 [10] Mark, D. J. and B. W. Bunch(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.
 [11] Oey, L. Y. and G. L. Mellor(1993). "Subtidal variability of estuarine outflow, plume, and coastal current: a model study", Journal of Physical Oceanography. Vol 23, pp. 164 - 171.
 [12] Takeoka, H. and H. Mura(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.
 [13] Takeshi, H.(1988), The role of modelling in the control of seawater pollution. Water Science and Technology Vol. 20, pp. 277 - 286.

원고접수일 : 2009년 12월 07일

원고수정일 : 2010년 02월 10일 (1차)

: 2010년 03월 19일 (2차)

게재확정일 : 2010년 03월 24일