

## 생태-유체역학모델을 이용한 아산만 해양수질의 장기 예측

권철휘\* · 강훈\* · 조광우\*\* · 맹준호\*\* · 장규상\*\*\* · 이승용\*\*\* · 서정빈\*\*\*

\* (주)국도해양환경기술단, \*\* 한국환경정책·평가연구원, \*\*\* 한국농어촌공사 농어촌연구원

## Long Term Water Quality Prediction using an Eco-hydrodynamic Model in the Asan Bay

Chul-Hui Kwoun\* · Hoon Kang\* · Kwang-Woo Cho\*\* · Jun-ho Maeng\*\* ·  
Kyu-Sang Jang\*\*\* · Seung-Yong Lee\*\*\* · Jeong-Bin Seo\*\*\*

\* Land Ocean Environmental Co. Ltd, Hwaseong, 445-390, Korea

\*\* Korea Environment Institute, Seoul, 290, Korea

\*\*\* Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute, Ansan, 426-908, Korea

**요 약** : 아산만 해역으로 방류수가 배출될 경우, 생태-유체역학모델을 이용하여 아산만 해역의 장기 수질변화를 예측하였다. 생태-유체역학 모델은 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층모델과 수질시뮬레이션을 위한 생태계모델로 구성되어 있다. 생태-유체역학모델을 이용하여 아산만 해역의 장기 수질을 예측한 결과, 5개 정점에서 화학적산소요구량, 용존무기질소 및 용존무기인의 농도분포는 현재 계산결과에서 6개월 동안 증가하였다. 수치실험 수행시간 1년에서 2년 사이에서는 화학적 산소요구량, 용존무기질소, 용존무기인의 농도분포는 6개월 동안 증가한 농도분포가 차츰 감소하는 경향을 보였으며, 3년에서 10년 사이에서는 일정한 농도분포를 보였다. 화학적 산소요구량, 용존무기질소 및 용존무기인의 농도는 11~67%, 10~67% 및 0.57%의 범위로 증가하였다. 10년 동안의 수치 실험 결과 화학적산소요구량과 용존무기질소의 변화 폭이 크게 나타났다. 이는 하수처리장의 방류수 중 이 두 오염부하량이 많은 양을 차지하고 있기 때문이다. 아산만 연안해역에서 화학적산소요구량, 총질소, 총인의 농도는 해양수질환경기준 II등급으로 조사되었으나, 하수처리장의 방류수가 배출될 경우 사업지구 인근의 아산만 방조제 부근에서는 해양수질환경기준 III등급으로 나타났다.

**핵심용어** : 생태-유체역학모델, 화학적산소요구량, 용존무기질소, 용존무기인, 수질, 하수처리장, 아산만

**Abstract** : The long-term water-quality change of Asan Bay by the influx of polluted disposal water was predicted through a simulation with an Eco-hydrodynamic model. Eco-hydrodynamic model is composed of a multi-level hydrodynamic model to simulate the water flow and an ecosystem model to simulate water quality. The water quality simulation revealed that the COD(Chemical Oxygen Demand), dissolved inorganic nitrogen(DIN) and dissolved inorganic phosphorus(DIP) are increased at 5 stations for the subsequent 6 months after the influx of the effluent. COD, DIN and DIP showed gradual decreases in concentration during the period of one to two years after the increase of last 6 months and reached steady state for next three to ten years. Concentration levels of COD, DIN, and DIP showed the increase by the ranges of 11~67%, 10~67%, and 0.5~7%, respectively, which represents that the COD and DIN are the most prevalent pollutants among substances in the effluent through the sewage treatment plant. The current water quality of Asan Bay based on the observed COD, TN and TP concentrations ranks into the class II of the Korean standards for marine water quality but the water quality would deteriorate into class III in case that the disposal water by the sewage plant is discharged into the Bay.

**Key Words** : Eco-hydrodynamic model, COD, DIN, DIP, Water quality, Sewage treatment plant, Asan bay

### 1. 서 론

본 연구 대상해역인 아산만 해역은 한반도 서해 중부에 위치한 개방형만으로 주변에 남양호, 아산호, 삼교호 등의 인공호수

로 둘러싸여 있다. 인근 지역에 아산국가산업단지(포송지구, 고대-부곡지구)가 위치하고 있어, 아산국가산업단지에서 발생하는 폐수는 처리하여 아산만에 방류하고 있는 실정이다. 또한 인주 지방산업단지에서 발생하는 폐수는 전량 처리하여 농업용수로 재활용 할 계획이었으나, 시설투자비와 유지관리비의 부담으로 어려움을 겪고 있어 인주지방산업단지에서 발생된 폐수를 처리

\* 대표저자 : 정희원, kwounch@hanmail.net, 031-221-7812

하여 아산만 해역에 방류할 경우 기존에 아산국가산업단지에서 발생하는 폐수와 함께 연안해역의 오염을 가져 올 수 있다.

연안해역에 오염물질이 유입되면 부영양화에 따른 심각한 오염현상이 발생되는데 이러한 현상은 식물플랑크톤의 증식과 관련이 있으며, 식물플랑크톤의 증식에 관여하는 요소로는 기상조건, 빛, 영양염류, 해수의 흐름, 수온 및 염분 등이 있다.

식물플랑크톤의 증식에 관여하는 요소를 규명하기 위해서는 생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)이 유용한 수단이 될 수 있다. 생태-유체역학모델은 Kremer and Nixon(1978)이 내만에서 부유물 현존량의 계절변화 및 그 원인을 해석하기 위하여 개발된 후, 만 내에서의 수질예측(Nakata, 1993), 적조문제에 관한 연구(Kishi and Ikeda, 1986; Yanagi *et al.*, 1995; 권과 조, 2002), 오염된 만에서의 수질환경 운영방법(Yanagi, *et al.*, 1997) 및 해양에서의 화학물질에 대한 시공간적 거동(김, 2007) 등에 대한 연구 등이 행해져 왔다.

우리나라 연안해역을 대상으로 하는 물질순환이나 생태계모델에 대한 연구는 김 등(1994)의 마산만에서 부영양화 제어를 위한 생태계모델 적용, 김(1998)의 울산만의 수질 시뮬레이션, 김(1999)의 황해의 부영양화 모델링, 강과 김(2006)의 가막만에서의 환경용량 산정, 홍 등(2007)의 진해만에서의 수질개선을 위한 생태계모델링 등이 있다. 연안해역에서 장기적인 수질관리대책을 수립하기 위해서는 이러한 생태계모델을 이용하여 장래 수질에 대한 수질 예측이 선행되어야 한다.

따라서 본 연구는 인주지방산업단지에서 처리하여 발생하는 폐수가 연안해역에 지속적으로 방류될 경우, 식물플랑크톤의 증식에 영향을 주는 요소들의 유기적인 관계를 규명할 수 있는 생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)을 이용하여 10년 이상의 지속적인 오염물질 유입이 내만해역의 수질인자에 미치는 영향을 예측하고, 그 결과를 수질관리 방안의 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구 대상지역

본 연구 대상지역은 경기도 평택시와 충청남도 아산시, 당진군 사이에 있는 만으로서 길이는 40km, 만의 입구는 2.2km이다 (Fig. 1). 평균조차가 6.1m 최대 9.6m에 달하는 우리나라에서 조석간만의 차가 큰 북서방향의 개방형만으로 겨울에는 대륙성 기후, 여름에는 해양성 기후의 영향이 뚜렷하다.

또한 주변에 삼교, 아산 및 대호 방조제 등이 건설되었으며, 연안유역을 따라 대규모 국가 산업단지가 위치하고 있어 오염물질이 대량으로 유입시 연안해역의 해양환경 변화가 클 것으로 예상되는 지역이다.

### 2.2 생태계 모델링

본 연구에 사용된 생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)은 해수유동 모델과 생태계모델로 구성되어 있다.

해수유동 모델은 中田 등(1985)에 의해 개발 적용되어진 다층모델이며, 생태계모델은 Kremer와 Nixon(1978)에 의해 개발, 적용된 모델의 방정식을 Nakata와 Taguchi(1982)에 의해 grid 형태로 구성된 모델을 사용하였으며, 연구자들에 의해서 개량되어 국내 연안에서 적용성이 검토된 모델이다.

해역의 임의 지점에 있어 구성요소의 현존량(B)의 시간에 따른 농도 변화는 식 (1)의 물질수지방정식으로 기술된다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z}$$

조석류 또는 잔차류를 의해서 운반되는 이류효과를 나타내는 항

$$+ \frac{\partial}{\partial x} [Kx \frac{\partial B}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [Ky \frac{\partial B}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [Kz \frac{\partial B}{\partial z}]$$

난류확산(혼합)을 나타내는 항

$$+ \frac{dB}{dt}$$

생물·화학적인 모든 과정을 포함하는 항

(1)

여기서, x, y, z는 좌표변수, u, v, w는 x, y, z방향의 유속 성분, Kx, Ky, Kz는 x, y, z방향의 와동확산계수를 나타내며, B는 수질구성요소의 현존량(또는 농도), t는 시간, dB/dt는 모든 생물·화학적 과정에 의해 단위시간당 구성요소의 변화량을 나타낸다.

식물플랑크톤 구성요소의 경우 수역내의 우점종에 대한 평균적인 단일종 군집을 고려하고, 명백한 종의 천이가 관찰된 수역에서는 복수의 그룹을 고찰, 각각 다른 체내 영양소 조성이나 온도, 광, 영양염으로의 응답양식을 고찰하는 것이 필요하고, 중간경쟁의 문제에 대한 생물변수를 선택할 때에 불확실한 요인이 많기 때문에 가능한 간단하게 모델화 하였다.

식물플랑크톤 생물량, P(mg C/m<sup>3</sup>)의 시간에 따른 농도변화는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP}{dt} = \text{광합성에 의한 증식} - \text{세포외분비} - \text{호흡} - \text{동물플랑크톤에}$$

의한 섭취-고사-침강

(2)

식물플랑크톤 구성요소와 같이 평균적인 단일 동물플랑크톤 군집을 대상으로 하여, 동물플랑크톤 생물량 Z의 시간에 따른 농도변화를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dZ}{dt} = \text{섭식} - \text{배분} - \text{배설} - \text{자연사망} \pm \text{일주수직이동}$$

(3)

본 모델에서 현탁유기물 구성요소는 비생물성 입자상유기물(detritus)을 의미하며, 탄소량 단위(mg C/m<sup>3</sup>)로 표현하며 시간변화를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dPOC}{dt} = \text{식물플랑크톤 고사} + \text{동물플랑크톤 배분} +$$

동물플랑크톤 자연사망-현탁유기물의 세균에 의한 분해-침강+계외로부터 유입

(4)

용존유기물(DOM) 구성요소는 탄소량 단위의 DOC로 표현

되며, 용존유기인(DOP) 및 용존유기질소(DON)는 C/P, C/N 조성비를 이용해서 환산하는데, DOC의 시간변화는 식(5)와 같이 표현된다.

$$\frac{dDOC}{dt} = \text{식물플랑크톤의 세포외분비+현탁유기물의 분해로 인한 생성} - \text{용존유기물의 무기화+계외로부터 유입} \quad (5)$$

DIP와 DIN의 생물과정에 관한 수식화는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{d(N, P)}{dt} = -\text{식물플랑크톤에 의한 섭취+식물플랑크톤의 호흡} + \text{동물플랑크톤의 배설+현탁유기물의 분해+용존유기물의 무기화+계외로부터 공급} \quad (6)$$

COD는 수중의 분해하기 쉬운 유기물의 존재량을 나타내는 지표로, 생물로서는 식물 및 동물플랑크톤, 비생물로는 현탁유기물이나 용존유기물의 4가지 유기물의 거동을 알면, COD의 시간변화를 알 수 있다. 따라서 위에서 설명한 각 생물과정의 수식화를 통해서 해역 내 각 형태의 유기물에 대한 단위시간당의 증감량이 구해진다.

즉  $\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^*, \left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)^*, \left(\frac{\partial POC}{\partial t}\right)^*, \left(\frac{\partial DOC}{\partial t}\right)^*$ 가 유기물 변화량을 나타낸다. 이들은 탄소량으로 나타낸 변화량이지만 이 탄소량을 COD 농도로 환산하는 계수를 곱함으로써 COD의 변화량 즉 내부생산량을 평가할 수 있으며, 내부생산량은 식 (7)과 같은 수식화로 표현된다.

$$\left(\frac{\partial COD}{\partial t}\right) = [COD: C_p] \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) + [COD: C_z] \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right) + [COD: C_{POC}] \cdot \left(\frac{\partial POC}{\partial t}\right) + [COD: C_{DOC}] \cdot \left(\frac{\partial DOC}{\partial t}\right) \quad (7)$$

생태계모델 내의 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 현탁유기물, 용존유기물, 용존무기인, 용존무기질소의 반응식은 식 (2)~(6)에 나타낸 바와 같다.

### 2.3 입력자료

본 연구의 모델 계산 영역은 아산만을 중심으로 서해대교와 한진각까지를 대상해역으로 하였으며, 대상해역의 x, y 방향의 격자크기는 해안선 굴곡을 충분히 고려할 수 있도록 100m로 하였다.

격자망의 구성은 x방향으로 107개, y방향으로 140개의 격자로 하였으며, 연직방향으로는 유광층의 깊이를 고려하여 총 3개 층, 계산된 총 격자수는 44,940개(107×140×3)로 구성하였다. 모델영역 내의 해수 유동을 재현하기 위하여 아산만의 탁월분조인 M<sub>2</sub>분조를 이용하였으며, 개방경계 온도 및 염소량의 초기치는 아산만 인근에서 실측된 값을 이용하였다.

해저마찰계수는 심해의 최적치로서 일반적으로 해의 안정성을 주는 R=0.0025를 적용하였으며(해안연구소, 1989), 수평확산계수는 x, y 방향 모두 1.0×10<sup>5</sup>cm<sup>2</sup>/sec를 적용하였다.

바람의 영향은 시·공간적으로 풍향과 풍속이 달라서 그 적용성이 힘들어 고려하지 않았으며, 모델의 계산 시간은 해의 안정성을 고려하여 20조석 주기로 하였으며, 해수유동모델의 입력자료는 Table 1과 같다.

3차원 해수유동모델에서 계산된 조석류가 정상상태에 도달한 후 마지막 한 조석을 평균해서 잔차류를 계산 한 후 조석류가 재현한 유동특성이 해역의 유동을 잘 재현하는지 평가하기 위하여 평택항 검조소의 조위 관측자료와 한국농촌공사(2007)에서 관측된 조류 및 잔차류에 대하여 검증을 하였다.

생태계모델은 해수유동모델의 잔차류 성분을 유동장으로 하여, 3차원 해수유동모델의 격자구성과 동일하게 적용하였으며, 계산시간은 30일을 기준으로 현 상태의 화학적산소요구량, 용존무기질소 및 용존무기인에 대하여 수질모의를 실행하여 관측된 수질자료와의 검증을 거쳐 각 단계별(6개월~10년)로 시뮬레이션을 실행하였다.

각 층별 초기 농도와 경계에서의 농도는 대상해역에서 Fig. 1의 5개 정점에서 2005년에 관측한 자료를 입력하였으며(Table 2), 대상해역의 오염부하원으로는 Fig. 1의 A지점이며, 오염부하량은 방류수 수질기준을 적용하여 모델 내에 입력하였다(Table 3). 또한 생태계모델의 시뮬레이션에 이용한 생물학적 parameter는 기존의 연구자료와 문헌조사 자료를 기초로 아산만의 해양학적 특성을 고려하여 선정하였다(Table 4).

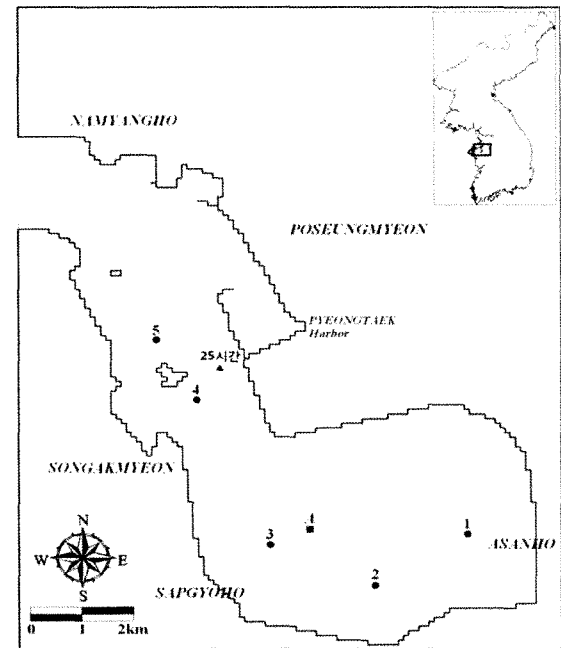


Fig. 1. The map of study area.

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$
Total mesh	$107 \times 140 \times 3 = 44,940$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	4sec
Level	1 : 0 ~ 3m 2 : 3 ~ 6m 3 : below 6m
Tidal level and degree at open boundary	A : 285.30cm, 120.
Water temperature and salinity at open boundary	1 : 15.0°C, 31.85‰
Coriolis coefficient	$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\psi$
Surface & Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity coefficient	1.0E5 (cm <sup>2</sup> /s)
Diffusion coefficient	1.0E5 (cm <sup>2</sup> /s)
wind speed	-
Calculation time	20 tidal cycle

Table 2. Input data for an ecosystem model

Parameter	Input values							
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 100\text{m}$							
Water depth	chart datum + MSL							
Time interval	100sec							
Initial condition for compartments								
level	DO ( mg/ℓ )	COD	DIP ( μg-at/ℓ )	DIN	POC	DOC ( mg-C/m <sup>3</sup> )	PHYTO	ZOO
1~3	8.60	1.56	1.21	30.57	300.0	1500.0	365.0	36.5
Boundary condition for compartments								
level	DO ( mg/ℓ )	COD	DIP ( μg-at / ℓ )	DIN	POC	DOC ( mg-C/m <sup>3</sup> )	PHYTO	ZOO
1~3	10.21	2.13	1.056	54.482	300.0	1500.0	365.0	36.5
Horizontal viscosity coefficient	1.0 E5(cm <sup>2</sup> /s)							
Horizontal diffusion coefficient	1.0 E5(cm <sup>2</sup> /s)							
Vertical diffusion coefficient	level 1~3 : 1.0(cm <sup>2</sup> /s)							
Calculation time	60 tidal cycles							

Table 3. Discharged water quality standards

Item	BOD	COD	SS	TN	TP	Flow
Concentration	8mg/ℓ	9mg/ℓ	7mg/ℓ	20mg/ℓ	2mg/ℓ	9,600m <sup>3</sup> /d
Pollution load	76.8kg/d	86.4kg/d	67.2kg/d	192.0kg/d	19.2kg/d	

Table 4. The biological parameters used in an ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit	Input Values
1	$\alpha_1$	maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.3
2	$\alpha_2$	respiration rate of phytoplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.05
3	$\alpha_3$	maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.03
4	$\alpha_4$	death rate of phytoplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.02
5	$\alpha_5$	natural death rate of zooplankton at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.050
6	$\alpha_6$	mineralization rate of POC at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.030
7	$\alpha_7$	mineralization rate of DOC at 0°C	day <sup>-1</sup>	0.008
8	$\alpha_8$	oxygen consumption rate of sediment at 0°C	day <sup>-1</sup>	1.00
9	$K_{SP}$	half saturation constant for uptake of PO <sub>4</sub> ³⁻-P at 0°C	μg-at/ℓ	0.5
10	$K_{SN}$	half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	μg-at/ℓ	5.0
11	Iopt	optimum intensity of radiation for photosynthesis	ly/day	200.0
12	I <sub>max</sub>	maximum intensity of sunlight at sea surface	ly/day	856.0
13	D	length of day	day	0.587
14	ko	dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m <sup>-1</sup>	0.40
15	γ	constant of dissipation coefficient depending on Chl.a	m <sup>-1</sup> (mg Chl.a/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	0.0179
16	P*	function of grazing	mg C/m <sup>3</sup>	70.0
17	μ	digestion efficiency of zooplankton	%	70.0
18	λ	total growth efficiency of zooplankton	%	30.0
19	κ	percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC	%	20.0
20	WP	settling velocity of phytoplankton	m/day	0.173
21	Ka	reaeration coefficient at sea surface	day <sup>-1</sup>	0.15

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 해수유동 시뮬레이션

3차원 해수유동모델을 이용하여 아산만 해역의 조석류를 해의 안정조건을 고려하여 수치가 안정되는 20조석 주기를 택하였으며, 마지막 1조석에 대하여 잔차류를 계산하여 생태계모델의 입력자료로 이용하였다.

아산만 해역에서 수치실험을 한 결과 한진각과 노미각 사이를 외해의 경계로 하여 내부 조류의 변화를 보면, 창조시 외해에서 유입한 해수는 빠른 유속으로 개방경계를 지나 행담도와 평택항을 지나는 사이에 가장 강한 유속을 나타내고 있으며, 유속의 크기는 약 1m/s로 나타났다.

외해에서 유입한 해수는 대상해역을 중심으로 삼교방조제를 지나 아산방조제 방향으로 반시계방향의 와류가 형성되며, 층별 흐름의 경향은 표, 저층이 유사하게 나타났으며, 표층에서 가장 강한 유속을 보였다. 또한 낙조시의 흐름은 창조시와 반대의 경향을 보였으며, 평택항과 행담도 사이를 가장 빠르게 통과하여 외해로 빠져나갔으며, 표층에서 약 0.8m/s로 가장 강한 유속을 보였고, 창조류시 더 강한 유속을 보이고 있다.

연안해역에서 물질분포에 중요한 역할을 하는 잔차류의 특성을 보면, 외해에서 유입한 해수는 사업지구를 중심으로 시계방향의 와류가 형성되며, 생성된 와류는 행담도를 지나 외해로 흐르는 경향을 보였다.

유속의 크기는 개방경계 부근에서 약 0.3m/s로 나타났으며,

만 중앙부에서는 약 0.05~0.10m/s로 나타났다. 층별 유속의 크기는 다르지만 흐름의 방향은 비슷한 경향을 보였다(Fig. 2). 또한 해수유동 모형의 검증에 위해 평택항 검조소에서 관측된 조위자료를 이용하여 대조기와 소조기 때의 일조위변화곡선을 본 모델에서 계산된 조위와 비교하였으며, 한국농촌공사(2007)가 25시간 동안 연속측류해서 최소 자승법으로 조화분해하여 얻은 조류타원도의 실측치와 모델에서 모의된 계산치를 비교하였고(Fig.3), 관측된 조류 성분에서 잔차류 성분을 추출하여 모델에서 계산된 잔차류 성분과 비교 분석하였다(Fig. 4).

본 모형에서는 평균조인 M<sub>2</sub> 분조의 합성에 의해 조석을 재현하였으므로 실제조석에 비해 오차가 나타날 것으로 예상되었으나 본 모델에서 계산된 조위값은 고조위 3.3m, 저조위 -3.8m로 평택항 검조소에서 관측된 대조기 고조위 4.6m, 저조위 -4.8m, 소조기 고조위 2.2m, 저조위 -2.5m의 중간크기로 나타나 비교적 대상해역의 조위를 잘 재현한 것으로 판단되며, 조류타원도를 도시하여 관측치와 계산치의 유속의 크기와 흐름을 비교한 결과 관측치와 계산치가 각각 0.97m/s와 0.81m/s로 유사하게 나타났으며, 흐름방향 또한 관측치와 계산치가 유사하게 나타나 M<sub>2</sub>분조로 수치 실험한 결과임을 감안 할 때 관측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다. 또한 Fig. 5에 시간별 잔차류의 유속을 비교 분석한 결과 관측치 유속은 0.06~0.25m/s(평균 0.13m/s), 계산치 유속은 0.01~0.29m/s(평균 0.11m/s)로 나타나 유속의 크기가 관측치와 유사한 분포를 보임으로써 아산만의 잔차류 흐름을 비교적 잘 재현 한 것으로 판단된다.

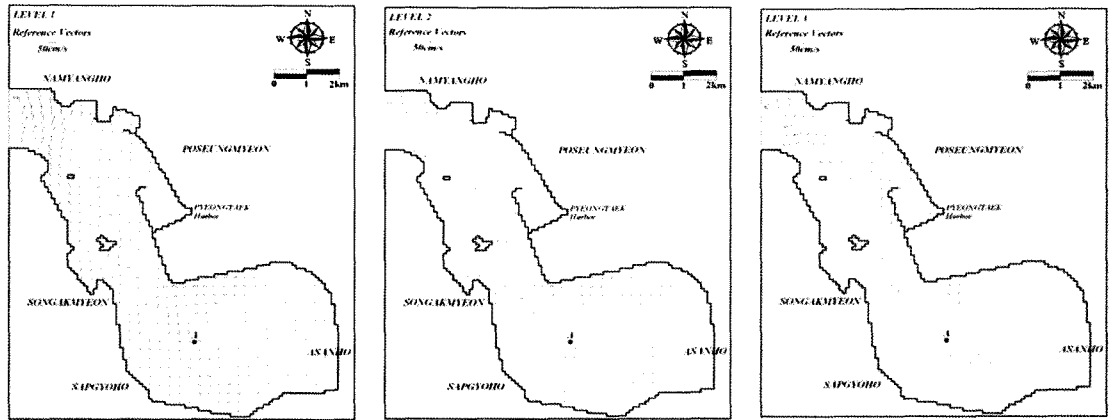


Fig. 2. Computed residual currents at 1st, 2nd and 3rd level in the Asan Bay.

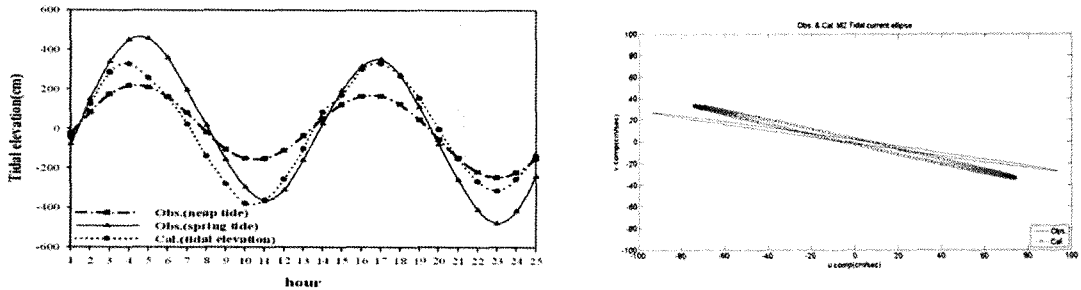


Fig. 3. Comparison of tidal elevation and current ellipses between the computed and the observed results.

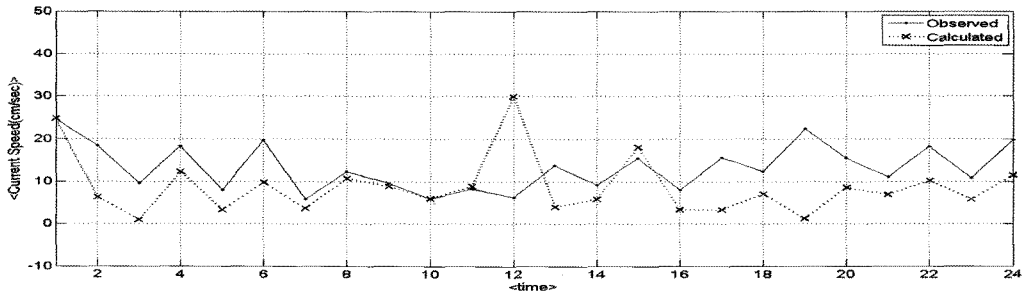


Fig. 4. Comparison of residual current between the computed and the observed results.

### 3.2 생태계 시뮬레이션

3차원 해수유동모델의 잔류류 성분을 이용하여 생태계모델의 초기조건과 경계조건, 오염부하량을 입력하여 생태계모델을 수행하였다. 계산된 수질예측 결과에 대한 타당성을 검토하기 위하여 수질인자 중 용존무기인, 용존무기질소 및 화학적산소요구량의 계산치 및 2005년 표층 관측자료와 비교하여 모델의 적용성을 검토하였다(Table 5). DIP의 경우, 실측값은 0.039~0.044mg/l, 계산값은 0.025~0.049mg/l을 나타내었으며,

해역의 평균 상대오차는 11.05%로 전체적으로 양호하였다.

DIN의 경우, 실측값은 0.384~0.483mg/l, 계산값은 0.358~0.512mg/l을 나타내었으며, 평균 상대 오차가 10.96%로 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

COD의 경우, 실측값은 1.40~1.60mg/l, 계산값은 1.35~1.94mg/l을 나타내었다. 상대오차는 해당도 위쪽의 정점 5에서 높게 나타났으나, 평균 7.96%로 재현성은 양호한 것으로 나타났다. 실측치에 대해 계산치가 적합한지를 판단하기 위하여 각

항목별로 단순회귀분석을 실시하여 유사 정도를 검토하여 Fig. 5에 나타내었다. 단순회귀분석결과 실측값과 계산값의 관계 정도를 나타내는 상관계수 r(correlation coefficient)은 COD, DIN 및 DIP는 0.71, 0.69 및 0.87로 나타났다.

### 3.3 시계열 분석

생태계 시뮬레이션을 통하여 적용성이 검토된 모형을 이용하여 현재의 보정된 각 구성 요소들에 대한 분포를 기준으로 아산만 연안해역에 하수처리장 방류수가 지속적으로 방류될 경우를 가정하였다. 모델 수행과정 중 현재상황, 1개월, 6개월, 1년, 2년, 3년, 4년, 5년 및 10년 후의 시점에 대한 모델결과를 도출하였다. 5개 정점(Fig. 1)에서의 COD, DIP, DIN의 농도분포를 살펴보면, 현재상황에서 6개월 후까지는 COD를 제외한 항목들에서 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 하수처리장에서 방류된 방류수가 단기간에 아산만 해역에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 1년 후의 시점부터 2년 후의 시점 사이에 나타난 COD, DIP, DIN의 농도분포는 차츰 감소하는 경향

을 보였으며, 3년 후의 시점부터 10년 후의 시점 사이에서 COD, DIP, DIN의 농도분포는 일정하게 유지되는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이와 같은 현상은 방류수 방류후 1년 후의 시점까지는 수질인자의 농도가 증가하는 양상을 나타낸 후, 3년 후의 시점까지는 소폭 감소하는 경향을 보이다가 3년 이후의 시점부터는 안정적인 정상상태로 돌입하였다고 판단할 수 있을 것이다. 10년 후의 수질항목 각각의 농도변화를 살펴보면, COD의 경우에는 11~67%, DIN의 경우에는 10~67%, DIP의 경우에는 0.5~7%의 범위로 증가하는 것으로 나타났다.

또한 10년 동안의 수치실험 결과 COD와 DIN 변화 폭이 크게 나타났는데, 이것은 하수처리장 방류수에서의 배출 부하량이 TN이 192kg/d, COD가 86kg/d로 오염부하량이 크기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 이상과 같이 아산만 연안해역에서 COD, TP, TN의 현황 농도는 해역수질환경기준 II등급을 나타냈으나, 하수처리장의 방류수가 배출될 경우 아산만 방조제 부근 해역에서는 해역수질환경기준 III등급으로 변화할 것으로 파악되었다.

Table 5. The comparison of the computed values with the observed surface water DIN, DIP and COD in the Asan bay

St.	DIP(mg/l)			DIN(mg/l)			COD(mg/l)		
	Obs.	Cal.	RE(%)	Obs.	Cal.	RE(%)	Obs.	Cal.	RE(%)
1	0.041	0.049	19.5	0.421	0.452	7.4	1.60	1.62	1.3
2	0.033	0.036	9.1	0.384	0.358	6.8	1.60	1.74	8.7
3	0.039	0.036	7.7	0.401	0.455	13.5	1.40	1.35	3.6
4	0.030	0.025	16.7	0.483	0.417	13.7	1.60	1.52	5.0
5	0.044	0.045	2.3	0.451	0.512	13.5	1.60	1.94	21.3

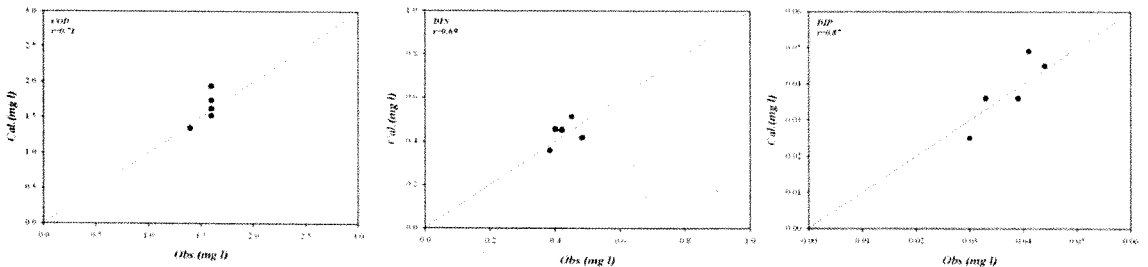


Fig. 5. Comparisons between predicted and observed surface water quality.

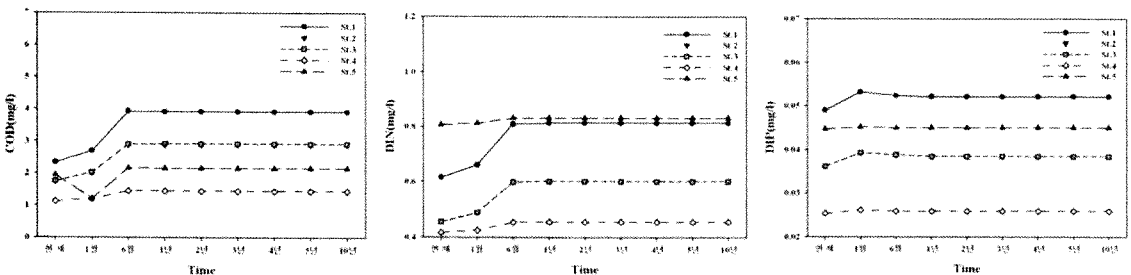


Fig. 6. Variation of surface water quality with time at the station.

#### 4. 결론

인주지방산업단지 조성사업은 지방공업을 육성하고 지방경제의 자력성장을 구축함은 물론 국토의 균형 발전을 이루는데 있다. 인주지방산업단지에서 발생하는 폐수는 전량 처리하여 공업용수로 재활용 할 계획이었으나, 시설투자비와 유지관리비의 부담으로 해양으로 방류구를 매설하여 해양방류를 할 경우 연안해역의 해양환경 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 10년후의 시점까지 장기적인 영향예측 수치실험을 수행하였다. 3차원 해수유동모델을 이용하여 사업지구 인근해역의 해수 유동 특성을 살펴보면, 창조시 외해에서 유입한 해수는 행담도와 평택항을 빠르게 통과하여 삼포방조제를 따라 아산방조제 방향으로 반시계방향의 와류가 형성되었다. 표층에서 가장 빠른 유속을 보였으며 층별 흐름의 방향은 유사하게 나타났다. 낙조시의 흐름은 창조시와 반대의 흐름을 보였다. 연안해역의 물질분포에 영향을 미치는 잔차류의 분포 특성을 보면 외해에서 유입한 해수는 사업지구를 중심으로 시계방향의 와류가 생성되며 생성된 와류는 행담도를 지나 외해로 흐르는 경향을 보였다.

해수유동모델의 잔차류 성분을 생태계모델의 입력인자로 활용하여 아산만에서 현재상황에서 10년후의 시점까지 생태계모델을 수행하였다. 생태계모델을 수행한 결과, 5개 정점(Fig. 1)에서의 COD, DIP, DIN의 농도분포는 방류수 방류후 1년후의 시점까지는 수질인자의 농도가 증가하는 양상을 나타낸 후, 3년후의 시점까지는 소폭 감소하는 경향을 보이다가 3년이후의 시점부터는 안정적인 정상상태로 돌입하는 것으로 나타났다.

연구대상 해역인 아산만 방조제 부근에서 COD, TN, TP의 현황농도는 해역수질환경기준 II등급을 나타내고 있으나, 하수처리장 건설로 인하여 해양으로 방류수가 배출 될 경우 아산만 방조제 부근 해역에서는 해역수질환경기준 III등급으로 변화하는 것으로 나타났다. 이상과 같이 방류수 배출에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 저감방안과 피해 최소화 방안을 구축하여야 할 것으로 판단된다.

이상과 같은 연구결과를 살펴보면, 현재 상황시점부터 10년후의 시점까지 10년간의 장기적인 수질을 예측하기 위해서는 모델에서 사용되는 수질인자 이외의 해양환경 요인, 기상조건, 대기 오염부하량, 퇴적물의 용출 등 여러 가지 외부환경요인을 고려한 모델의 수립 및 수행이 필요할 것으로 사료된다.

#### 사 사

본 논문은 한국과학재단 인력양성활용지원사업의 2003년도 후반기 해외 Post-doc. 연수지원 프로그램의 연구지원비로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] 강훈, 김중구(2006), 생태계모델을 이용한 가막만 해역의 환경용량산정, 한국환경과학회지, 제15권, 제10호, pp. 951-960.

[2] 권철휘, 조규대(2002), 한국 남해안에서 *Cochlodinium*적조 확산모델, 한국수산학회지, 제35권, 제6호, pp. 568-577.

[3] 김광수(1998), 생태계모델을 이용한 울산만의 수질 시뮬레이션, 한국항만학회, 제12권, 제2호, pp. 1-9.

[4] 김동명(1999), 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 부경대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 1-143.

[5] 김동명(2007), EMT-3D 모델을 이용한 동경만의 PFOA 시뮬레이션, 해양환경안전학회, 제13권, 제3호, pp. 173-181.

[6] 김중구, 박정길, 김광수(1994), 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용, 한국환경과학회지, 제3권, 제3호, pp. 186-195.

[7] 한국농촌공사(2007), 아산만 방조제 배수갑문 확장사업 환경조사보고서, p. 74.

[8] 한국과학기술연구원 해양연구소(1989), 沿岸環境 保全技術 開發研究, BSPG0083-242-4, p. 187.

[9] 홍석진, 이원찬, 정래홍, 오현택, 장주형, 구준호, 김동명(2007), 2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링, 해양환경안전학회, 제13권, 제2호, pp. 103-110.

[10] 中田喜三郎, 石川公海松川康夫(1985), 内灣の流動場の數値實驗. 沿岸海洋ノート, 22(2), pp. 96-108.

[11] Kishi, M and S. Ikeda(1986), Population dynamic of 'red tide' organism in eutrophicated coastal water-numerical experiment of phytoplankton bloom in the east Seto Inland Sea. *Ecol. Modelling*, 31: pp. 145-174.

[12] Kremer, J.N. and S.W. Nixon(1978). A coastal marine ecosystem In: Simulation and Analysis, Ecological Studies, 24. Springer, Berlin. p. 217.

[13] Nakata T.K.,(1993). Ecosystem Model; its formulation and estimation method for unknown rate parameter. *J. Adv. Mar. Tech. Conf.*, 8: pp. 99-138.

[14] Nakata T.K., Taguchi K.,(1982). Numerical simulation of eutrophication process coastal bay by eco-hydrodynamic model. (2) Ecological modeling, Bulletin of the National Research Institute of Pollution and Resources, 12(3), pp. 17-36.

[15] Yanagi, T., T. Yamamoto, Y. Koizumi, T. Ikeda, M. Kamizono and H.Tamori(1995), A numerical simulation of red tide formation. *J. Mar. Systems*, 6: pp. 269-285.

[16] Yanagi, T., K. Inoue, S. Montani and M. Yamada (1997), Ecological modeling as a tool for coastal zone management of Dokai Bay, Japan. *J. Mar. Systems*, 13: pp. 123-136.

원고접수일 : 2009년 2월 19일  
 원고수정일 : 2009년 3월 29일 (1차)  
 : 2009년 4월 20일 (2차)  
 : 2009년 6월 03일 (3차)  
 게재확정일 : 2009년 6월 25일