

## 폐쇄성 내만에 있어서 수질·저질 상호작용 모델링 Modeling of Water Quality with Sediment-Water Interaction at Sea Bottom in Semi-enclosed Coastal Waters - Application to Osaka Bay

한동진\* · 윤종성\*\*  
Dong Jin Han\* and Jong Sung Yoon\*\*

**요 지 :** 본 연구에서는 수층(water body)와 저지의 상호작용을 시뮬레이션하기위해 저질 모델을 구축하였다. 본 연구에서 구축한 모델은, 수층에서 저지층으로의 유기물질의 침강, 그리고 저지층에서 수층으로의 질소와 인의 용출을 상호작용으로 고려한 모델이다. 구축된 모델을 검증하기 위해 실측치를 이용하여 모델 재현성의 검토를 실시하였다. 오사카만을 대상으로 모델에 의해 얻어진 인의 용출속도를 실측치와 비교하였다. 그 결과 계산치와 실측치는 거의 일치하였으며, 계절별 용출속도의 변동 특성이 양호하게 재현되었다. 1950년부터 1999년에 걸쳐 약 50년간 수질과 저질의 재현 계산을 실시하여 모델의 재현성과 적용성을 평가하였다. 육지로부터의 오염물질 부하량과 수질의 경계조건, 그리고 3차원 유동모델의 경계조건에 대해서는 계절별 관측치를 이용하여 설정하였다. 계산 결과 질소, 인, 그리고 COD 농도 및 장기간에 걸친 수질의 변동특성이 양호하게 재현되었다.

**핵심용어 :** 수질·저질 모델, 용출, 상호작용, 폐쇄성 내만

**Abstract :** In this study, we developed a model to simulate the interaction between sediment and the overlying water. The model deals with water-sediment interaction in terms of the sedimentation of organic detritus from the pelagic zone into the benthic zone and the release of nutrients occurring in the reverse direction. The model was tested and verified by comparing the predicted release rates of phosphorus from the sediment in Osaka Bay with actual observed values. The results accurately reproduced the seasonal change in release rates. The results well represented seasonal change of the release rates. A long-term prediction of water and sediment quality was performed for the period from 1950 to 1999. Nutrient loads from land and the boundary conditions of 3-D baroclinic flows were season-adjusted. The model accurately reproduced the changing trends in phosphorus, nitrogen, and COD concentrations in Osaka Bay over a long period of time.

**Keywords :** water quality-sediment model, release, interaction, semi-enclosed costal water

### 1. 서 론

폐쇄성 내만에 있어서의 수질오염은 주로 영양염의 육지로부터의 부하, 내부생산에 의한 생성, 저지로부터의 용출 등에 기인하고 있다. 그 결과, 유입 부하량이 삭감되어도 기대한 수질개선이 지연되고 있다는 보고도 있다(山根, 1998). 수질개선의 시간 지연을 야기하는 요인 중의 하나로서 저지로부터 용출을 들 수 있다. 기존의 수치모델은 저지로부터의 용

출속도를 일정치로만 고려하는 모델이 거의 대부분이다(Jorgensen, 1975; Kamp Nielsen, 1975). 堀江·細川(1984)은 저지로부터 질소·인 용출기구를 고려한 연구를 실시하였으며, 細尾正明(1987)은 저수지를 대상으로 용출모델을 구축하였다. 그러나 오사카만과 같은 폐쇄성이 강한 연안역에는 수질 및 저지의 용출에 관한 메카니즘(mechanism)은 복잡하다. 혐기(anoxic)상태에서는 양이온과 결합하는 인의 탈착(desorption)이나 간극수 질소의 탈질(denitrification)작용에 의

\*(주) Hydro-soft 기술연구소(Hydro-soft Technology Institute Co. Ltd, 1-7-4, Minamihorie, Nishi-ku, Osaka, 550-0015, Japan)  
\*\*인제대학교 토목공학과(인제대학교 부설 건설기술연구소)(Corresponding author, Department of Civil Engineering, Inje University, Kimhae, 621-749, korea. civyunjs@inje.ac.kr)

해 저니로부터의 질소와 인의 용출속도가 크게 변화한다. 따라서 양이온과 결합하는 인의 탈착특성이나 간극수 질소의 탈질작용도 모델화에 고려하지 않으면 안 된다. 또한, 수질의 장기예측계산을 하는 경우에는 부하량의 변화에 대하여 수질의 변화뿐만 아니라, 저질의 변화도 계산할 필요가 있다.

폐쇄성 내만에 있어서 수질의 장기예측이나 수질의 공간 분포를 보다 정확히 파악하기 위해서는, 저니로부터 영양염의 용출구조를 도입한 모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서는, 이 저니 내의 질소·인의 용출기구를 고려하여 해수와 저니를 일체화한 수질·저질 모델을 구축하고자 한다. 여기에서는 모델의 개요와 parameter의 感度분석, 검증실험의 결과에 대해서 보고한다.

## 2. 모델의 개요

### 2.1 3차원 경압류(baroclinic) 흐름 모델

유동과 밀도장의 계산은 中辻(1994)가 오사카만의 해석에 이용하여 온 3차원 경압류(baroclinic) 유동모델을 이용한다. 수치모델은, 연속방정식, 3방향 운동방정식, 수온·염분의 확산방정식, 해수면에서의 열수지식 및 밀도의 상태방정식으로 구성되어 있다.

연안해역을 대상으로 한 수치 시뮬레이션에서는 수평방향의 와동점성계수를 일정치로 취급하는 경우가 많다. (예를 들면 岩佐·井上, 1983) 그러나 해협부 부근과 같이 흐름이 국소적으로 변화하는 경우에는 수평방향의 와동점성계수를 일정치로 취급하면 난류흐름을 평활화시키는 결과를 초래하여 유동장을 정확하게 재현하는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 조류 난류장에서의 난류의 표현을 위해 Smagorinsky (1963)의 SGS(Sub-Grid Scale) 모델에 기초하여 수평방향의 와동점성계수와 와확산계수를 이용하여 시·공간변화를 고려하였다. 또한, 연직방향의 와동점성계수와 와동확산계수는 Richardson수의 함수로서, 만 내의 밀도류에 의한 생성효과를 도입하였다. 3차원 경압류(baroclinic) 유동모델에 대한 자세한 내용은 中辻(1994)의 연구를 참조하기 바란다.

### 2.2 3차원 수질모델

본 모델에서는 해수(Pelagic Zone)와 저니(Benthic Zone)의 교환을 유기 Detritus의 저니로의 침강과, 저니에서의 무기영양염의 용출로서 고려하고 있다.

#### 2.2.1 해수(Pelagic Zone)

수질모델은 질소, 인, COD, 용존산소의 생물화학적인 변

화과정을 모델화하였다(山根, 1998참조). 물질의 수송· 확산에는 유동 모델에서 미리 구한 유속 3방향성분과 와동 확산계수를 사용하였다. 계산대상의 물질형태로서는 생물체유기물을 대표하는 식물 플랑크톤 량으로 클로로필 a, 영양염으로 무기태 질소(I-N), 무기태 인(I-P), 비생물체 유기태 질소(NL-O-N), 비생물체 유기태 인(NL-O-P), 화학적 산소요구량(COD), 그리고 용존산소(DO)를 설정하였다. 비생물체 유기물은 Detritus태와 용존태 유기물을 총칭한다.

#### 2.2.2 저니(Benthic Zone)

저질 모델에서는 저니에서의 유기물의 박테리아에 의한 분해·무기화 및 간극수 중의 무기물의 해수중으로의 확산과정을 모델화하고 있다. 저니 모델에서의 물질형태로서는 저니 내의 유기태 질소·인, 무기태 질소·인, 간극수 중의 무기태 질소·인을 설정하였다.

본 저질 모델에서는 다음과 같은 가정을 기본으로 하고 있다. (1) 저니에 있어서  $PO_4\text{-P}$ 와  $NH_4\text{-N}$ 의 분해생성속도는 미생물의 활성, 수온, O-P 함유량, O-N 함유량, DO에 의존한다. (2) 저니에 의해 분해·생성된  $PO_4\text{-P}$ 와  $NH_4\text{-N}$ 는 일정한 분배율로 간극수에 용존화되거나 니입자(泥粒子)로 흡탈착 된다. (3) 분해에 의해 생성된 용존태 인은 해수 중의 양이온과 결합하여 침강하지만, 그 일부는 다시 용출한다. 그러나, 결합형태에 따라 용출특성이 다르고 Al-P와 Fe-P는 용출하기 쉽지만, Ca-P는 거의 용출하지 않는다. (4) 저니로부터의  $PO_4\text{-P}$ 와  $NH_4\text{-N}$ 의 용출속도는 저니 위의 해수의 수온 및 유속,  $PO_4\text{-P}$ 와  $NH_4\text{-N}$ 의 농도에 의존한다. 또한,  $PO_4\text{-P}$ 의 경우는 저니 위의 해수의 DO에도 크게 의존한다. (5) 저니 간극수에 있어서  $NH_4\text{-N}$ 의 일부는 탈질에 의해 대기 중으로 방출된다.

한편, 본 연구에서의 저질모델의 구축에 있어서 堀江·細川(1984)와 細見正明(1987)의 기존의 연구와의 차이점은 다음과 같다. 위의 가정 (3)에 있어서 Al-P의 용출특성에 대해서 밝혀지지 않은 부분이 많았지만, 본 연구에서는 실내 용출실험을 실시하여 그 용출특성을 파악하였으며 모델에서 환원조건일 때 용출 가능하도록 설정하였다.

#### 2.2.3 저니 모델의 기초방정식

기초방정식은 細見正明(1987)과 堀江毅·細川恭史(1984)의 식을 기초로 설정하였다. 수질·저질모델의 자세한 내용에 대해서는 山根(1998)와 저자(2000)의 기존의 연구내용을 참조하기 바란다.

i) 저니에서의 유기태 인

$$\frac{dC_{MOP}}{dt} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MOP}}{\partial z} - D_{SP} \quad (1)$$

$t$ : 시간

$z$ : 저질내의 연직방향

$C_{MOP}$ : 저니에서의 유기태인의 농도(mg/g)

$S_{Ed}$ : 퇴적량(kg/m<sup>2</sup>/day)

$D_{SP}$ : 저니에서의 유기태인의 분해속도정수(1/day)

ii) 저니에서의 유기태 질소

$$\frac{dC_{MON}}{dt} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MON}}{\partial z} - D_{SN} \quad (2)$$

$C_{MON}$ : 저니에서의 유기태 질소의 농도(mg/g)

$D_{SN}$ : 저니에서의 유기태 질소의 분해속도정수(1/day)

iii) 저니에서의 무기태 인

$$\frac{dC_{MIP}}{dt} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MIP}}{\partial z} - \frac{1}{1+\Phi\alpha} D_{SP} + Q \quad (3)$$

$C_{MIP}$ : 저니에서의 무기태 인의 농도(mg/g)

$\Phi$ : 간극수량 · 건니비(乾泥比) (1/g)

$\alpha$ : 분배율(g/l)

$Q$ : 니입자로의 흡탈착속도(mg/g/day)

iv) 저니에서의 무기태 질소

$$\frac{dC_{MIN}}{dt} = \frac{S_{Ed}}{M} \cdot \frac{\partial C_{MIN}}{\partial z} - \frac{1}{1+\Phi\alpha} D_{SN} + Q \quad (4)$$

$C_{MIN}$ : 저니에서의 무기태 질소의 농도(mg/g)

v) 간극수에서의 무기태 인

$$\frac{dC_{WIP}}{dt} = \frac{1}{1+\Phi\alpha} D_{SP} + \frac{1}{\Phi} Q + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Phi \cdot DIF \cdot \frac{dC_{WIP}}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$C_{WIP}$ : 간극수에서의 무기태 인의 농도(mg/l)

$DIF$ : 확산계수(cm<sup>2</sup>/S)

iv) 간극수에서의 무기태 질소

$$\frac{dC_{WIN}}{dt} = \frac{1}{1+\Phi\alpha} D_{SN} + \frac{1}{\Phi} Q + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Phi \cdot DIF \cdot \frac{dC_{WIN}}{\partial z} \right) - DIN \cdot C_{WIN} \quad (6)$$

$C_{WIN}$ : 간극수에서의 무기태 질소의 농도(mg/l)

$DIN$ : 탈질속도정수(1/day)

vii) 흡착속도

저니중의 유기물의 분해에 의해 생성되는 무기태 질소와 인의 일부는 간극수중에 용존화되고, 나머지는 저니입자에 흡착된다. 이러한 저니입자로의 흡착속도는

$$\frac{dC_{WIN}}{dt} = \frac{C_{WIN} - C_{EXP}}{\alpha} \cdot \frac{1}{\frac{1}{1+\Phi\alpha} \cdot \frac{1}{T_{AD}}} \quad (7)$$

$C_{EXP}$ : 교환태 무기인의 농도(mg/g)

$T_{AD}$ : 흡착 평형에 이르기까지의 시간(day)

viii) 산화 · 환원조건에서의 탈착

\*산화조건

$$DE_{SP} = DE_O \times EXC_P \cdot \theta^{T-20} \quad (8)$$

\*환원조건

$$DE_{SP} = DE_A \times EXC_P \cdot \theta^{T-20} \quad (9)$$

$\theta$ : 온도정수

$DE_{SP}$ : 인의 탈착속도(mg/g/day)

$DE_O$ : 산화조건에서의 인의 탈착속도정수

$DE_A$ : 환원조건에서의 인의 탈착속도정수

$EXC_P$ : 환원조건에서 탈착 가능한 인의 농도(Fe-P)

### 3. 모델의 검증

계산영역은 Fig. 1에 나타난 오사카만을 중심으로 한 64 km×64 km를 대상으로 하였다. 수역 분할은 수평방향으로 2 km 격자, 연직방향으로는 내만의 유동 · 밀도 구조를 정확하게 표현하기 위해, 표층으로부터 2 m 두께로 10층,

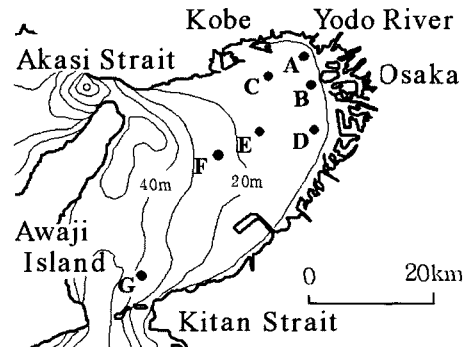


Fig. 1. Computational domain and representative observation points.

**Table 1.** The boundary conditions for flow and water quality model

		경계조건	춘 계	하 계	추 계	동 계	
유동모델	해면경계	기 온(°C)	16.3	26.7	15.2	5.5	
		운 량(雲量)	6.2	6.3	5.4	5.8	
		풍 속(m/s)	3.2	3.0	3.2	3.2	
		수증기압(hPa)	12.2	25.8	12.1	5.8	
		일사량(W/m <sup>2</sup> )	184.6	193.4	109.0	96.6	
	육측경계	유입량 (m <sup>3</sup> /s)	淀川	273.8	367.9	165.7	142.1
			大和川	23.8	27.2	21.2	16.1
		유입온도(°C)	18.0	28.9	18.0	7.0	
		유입염분(psu)	21.5	20.0	21.5	23.0	
	해측경계	조위변동		M2 평균조			
		수 온(°C)		13.0	22.0	22.0	11.0
		염 분(psu)		32.0	32.0	32.0	32.0
수질 저 질 모델	해측경계	COD mg/l	Akasi strait	2.0	2.6	2.0	1.3
			Kitan strait	1.5	1.9	1.5	1.1
		T-N mg/l	Akasi strait	0.36	0.38	0.36	0.34
			Kitan strai	0.36	0.38	0.36	0.34
		T-P mg/l	Akasi strait	0.034	0.039	0.034	0.029
			Kitan strai	0.030	0.031	0.030	0.029
		Chl.a mg/l	Akasi strait	0.004	0.005	0.004	0.005
			Kitan strai	0.004	0.005	0.004	0.005
		DO mg/l	Akasi strait	8.6	8.1	8.5	9.0
			Kitan strai	8.6	8.1	8.5	9.0

**Table 2.** Parameters of sediment model (standard values)

Variables		Value (unit)
Pelagic Zone	Maximum growth rate	2.4 (1/day)
	P nutrient half saturation	0.005 (g/m <sup>3</sup> )
	N nutrient half saturation	0.025 (g/m <sup>3</sup> )
	P decomposition rate	0.02 × 1.09 <sup>T-20</sup> (1/day)
	N decomposition rate	0.02 × 1.09 <sup>T-20</sup> (1/day)
	Reaeration	0.1 (1/day)
	Benthic Zone	P decomposition rate
N decomposition rate		1.0 × 10 <sup>-3</sup> (mg/g/day)
Distribution coeff. for P		12.5
Distribution coeff. for N		89
Diffusion coeff.		5.40 × 10 <sup>-3</sup> (cm <sup>2</sup> /s)
Denitrification rate constant		0.09 (1/day)
Settling velocity		0.3 (m/day)

10 m 두께, 15 m × 2층으로 총 13층으로 했다.

또한, 저니는 오사카만의 유동·밀도 구조를 기초로 18 개의 영역으로 분할하고, 저니의 깊이 100 cm까지를 8층으로 분할하였다.

육지로부터 유입하는 부하량은 오사카만으로 유입하는 21 개 하천의 유량 자료(建設省, 1973-1992)와 각 차치단체에

서 제공되는 유입수질자료(大坂府, 兵庫縣, 1983-1992)를 기초로 하여 설정하였다. 또한 외해경계수질은 淺海定線調査 자료(大坂府 水産試験場, 1973-1997)와 公共用水域 水質의 측정자료(大坂府, 1988-1997)를 기초로 하여 각 수질항목에 대해 설정하였다.

본 계산에 이용한 주된 계산조건은 Table 1, Table 2에

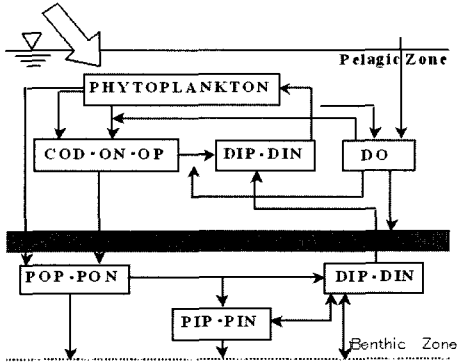


Fig. 2. Conceptual diagram of the sediment model.

나타냈다.

1965년부터 1999년까지의 부하량을 주어 수질 및 저질의 장기계산을 실시하였다. 육지로부터의 부하량 및 해수의 경계조건은 봄 · 여름 · 가을 · 겨울의 계절변화를 고려하였다.

### 3.1 Parameter의 민감도 분석

본 모델의 주요 parameter에 대하여 민감도를 조사하기 위해서 확산계수, 침강속도, 퇴적유기물의 분해속도, 인의 탈착계수 및 탈질속도 계수를 기준치에 대하여 각각 0.5배,

1.5배 및 2배 한 경우의 질소·인의 용출속도를 계산하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타낸다. 예를 들면 확산계수는 질소와 인의 용출속도에 대하여(Fig. 3(a)) 모두 正(+)의 상관관계를 가지고 있지만, 인의 용출속도가 질소의 용출속도에 비해 상대적으로 민감도가 낮은 것을 알 수 있다. 또한 질소·인 모두 해수로부터의 유기물 침강속도에 대해 正(+)의 상관관계를 가지며 다른 parameter에 비해 민감도가 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 인에 대해서는 탈착속도 계수가 용출속도에 대해서 민감도가 높으며, 질소에 관해서는 탈질계수 및 확산계수가 용출속도에 대해서 민감도가 높게 나타나고 있다. 양자는 負(-)의 상관관계에 있기 때문에, 탈질에 의해 저니로부터 질소의 용출이 억제되고 있다고 생각된다.

### 3.2 용출속도

저니로부터의 질소·인의 용출속도를 구하기 위해, 0-30 cm의 교란주상니(攪亂柱狀泥)를 이용해, 직상수를 현시수온, 현지 DO농도로 유지하면서 실내 용출실험을 실시했다. 실험 기간은 10일간이며, 실험개시 후 0, 1, 3, 5, 10 일째 합계 5회에 걸쳐, 실험장치 내의 I-N, I-P의 농도를 분석했다. 얻어진 시간별 농도변화를 기초로 질소와 인의 용출속도를 구하였다.

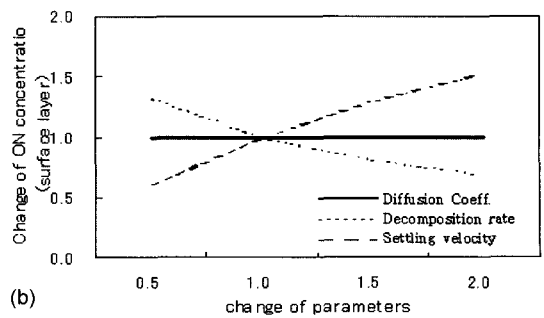
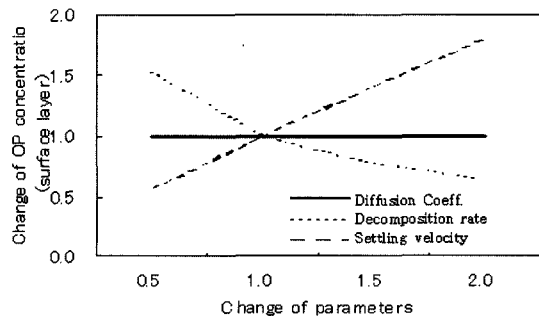
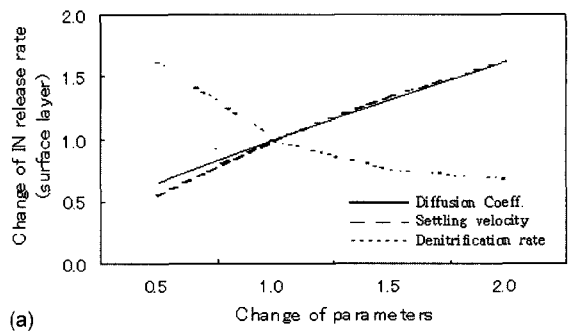
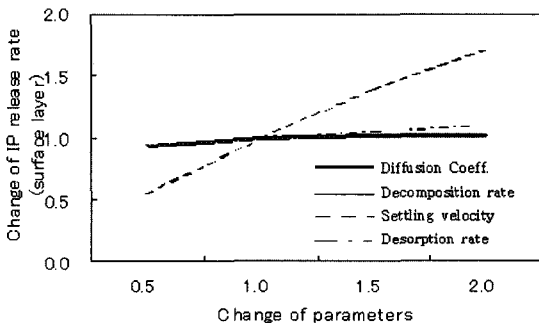


Fig. 3. Sensitivity of release rate for DIP and DIP in the upper figure, and OP and ON concentration in the lower figure.

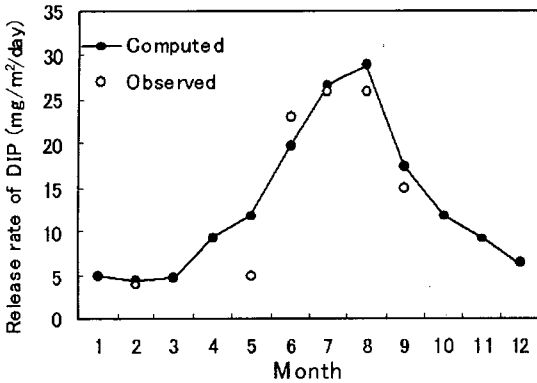


Fig. 4. Comparison of computed and observed DIP release rate.

모델의 재현성을 검토하기 위해, 오사카만의 만 안쪽부에 있어서 저니로부터의 DIP(용존무기태 인) 용출속도의 월별변화를 계산하였으며, 계산치와 실측치의 비교를 실시하였다. 그러나 용출속도조사를 여름에만 실시하였기 때문에, 월별 용출속도에 대해서는 과거의 조사결과를 이용하여 검증하였다. Horie and Hosokawa(1984)등의 조사에 의해서 얻어진 저니로부터 DIP 용출속도의 월별변화와 수치계산결과의 비교를 Fig. 4에 나타내고 있다. 계산치와 실측치는 거의 일치하며, DIP 용출속도는 겨울에는 5 mg/m<sup>2</sup>/day, 여름에는 25 mg/m<sup>2</sup>/day로 명확한 계절변동을 보이고 있다. 이 결과로부터 인의 용출속도는 저니 직상수의 수온과 DO농도에 의존하는 것으로 생각되어지며, 본 연구에서 제안한 모델이 그 계절변동을 양호하게 재현하고 있다는 것이 확인되었다. 특히 용존산소의 농도가 낮고, 수온이 높은 여름에 결

쳐 인의 용출속도가 급속히 높아지는 현상이 잘 재현되고 있다고 판단되어진다.

Fig. 5는, 오사카만에 있어서 질소와 인의 용출속도의 실측치와 계산치를 비교한 것이다. 인에 대해서는 여름철의 평균치를 이용하여 비교하였다. 만 안쪽부에서의 인의 용출속도는 30 mg/m<sup>2</sup>/day, 칸사이(關西)국제공항 주변에서는 10 mg/m<sup>2</sup>/day 전후의 값을 나타내고 있으며, 오사카만에서의 인의 용출속도를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 질소에 대해서는 8월의 실측치와 비교하였으며, 만 안쪽부에서는 실측치가 높게 나타나고 있지만, 만 중앙부에서는 거의 일치하고 있다.

### 3.3 저질

Fig. 6에 관측점 B, D, E, F에 있어서 저질의 I-N, I-P, T-P의 연직분포를 나타낸다. 실측치는 저자가 일본의 오사카만을 대상으로 현장조사 및 실험실내에서 분석한 값을 이용하였다(1999년). 표층에서의 I-P와 I-N농도는 실측치와 거의 일치하고, 약 20 cm깊이에 걸쳐서는 계산치가 실측치보다 약간 높은 값을 보이고 있다. T-P에 대해서는 지점 전체적으로 저질의 연직분포를 잘 재현하고 있다고 할 수 있으며, 특히 질소·인의 용출에 강하게 관계하고 있다고 생각되는 I-N, I-P의 재현성이 높은 것으로 나타났다.

### 3.4 수질

오사카만으로 유입하는 부하량은 1970년대에 peak를 맞이하여 1979년에 시행된 瀬戸内海 특별조치법에 따라 오사카만에 있어서 COD의 총량규제와 인의 삭감이 진행되어

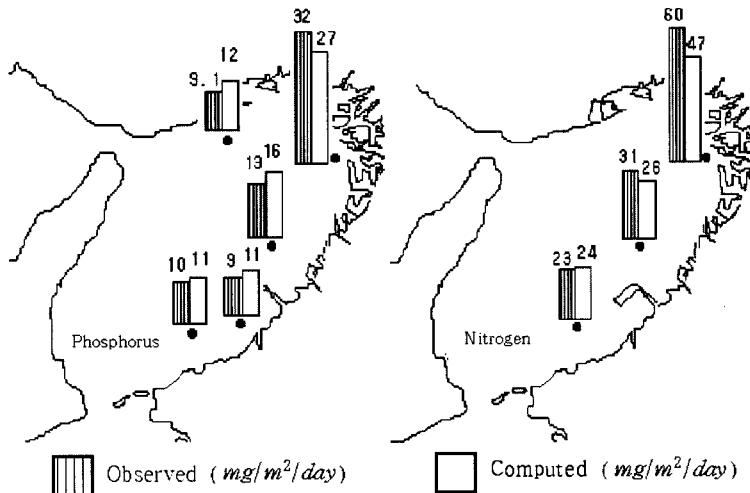


Fig. 5. Comparison between computed and observed release rate of DIN and DIP.

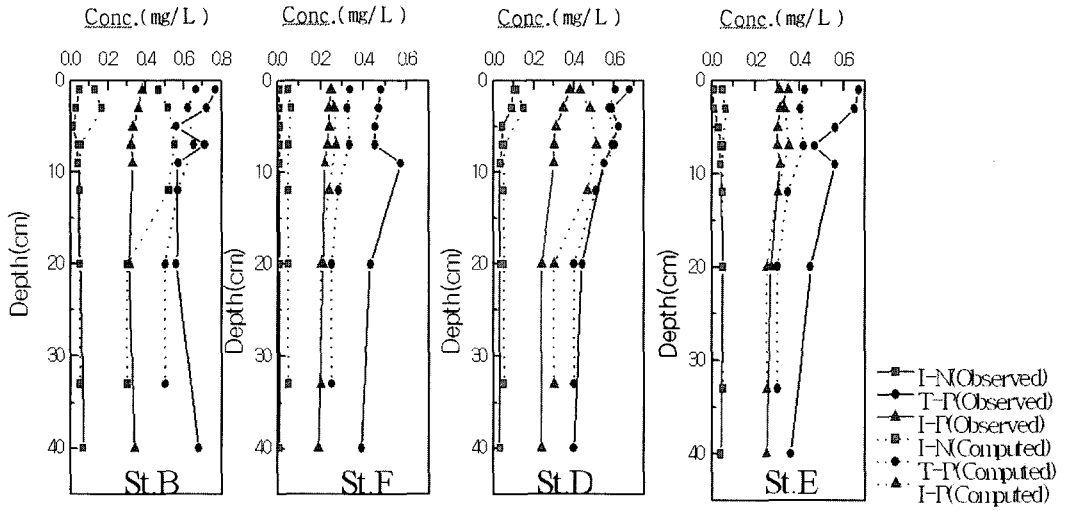


Fig. 6. Vertical profiles for IN, IP, and T-P of the sediment at different observation points.

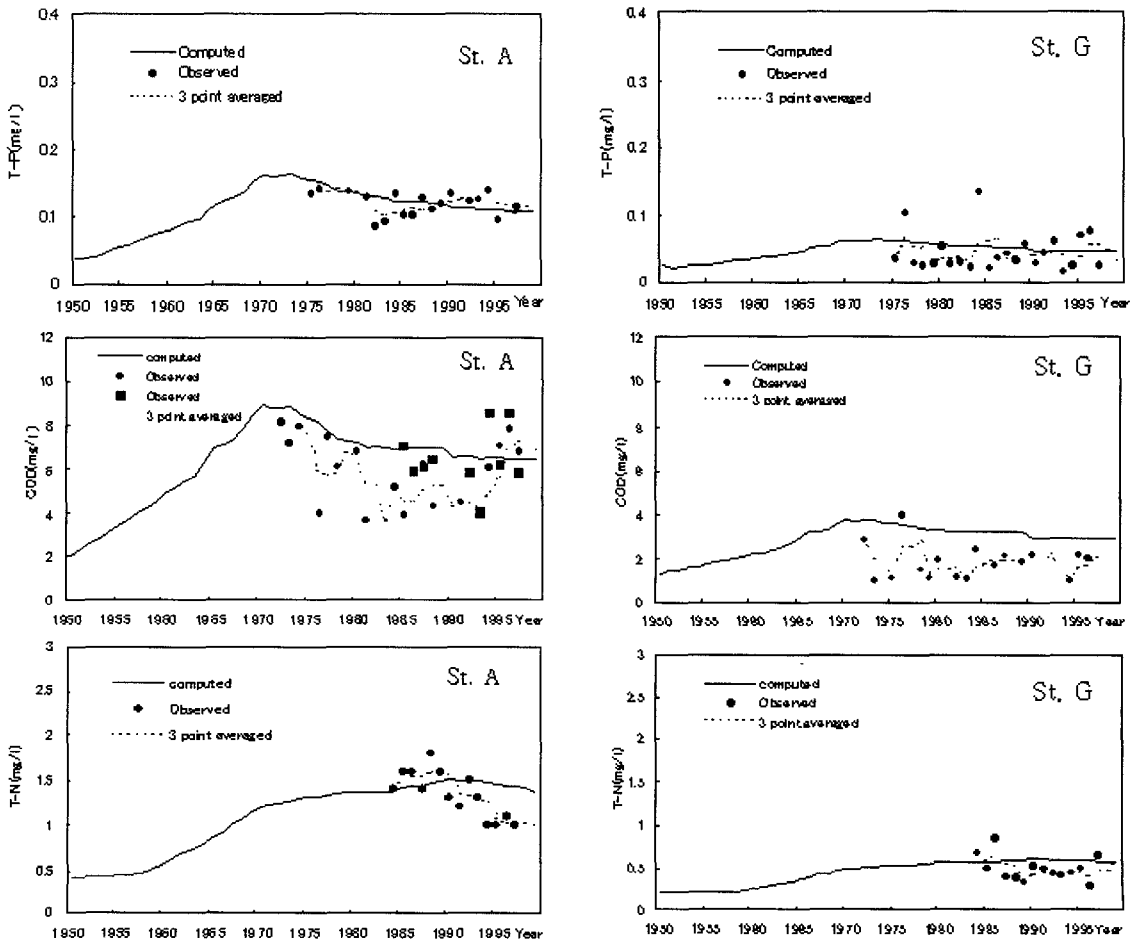


Fig. 7. (a) Comparison of computed and observed concentration of COD, T-P and T-N of water body (St. A), (b) Comparison of computed and observed concentration of COD, T-P and T-N of water body (St. G).

왔다. 이 시책에 의해 1979년 이후에는 COD와 인의 유입 부하량이 감소하고 있다.

Fig. 7은 해수중의 T-P, COD, T-N 농도에 대한 수치계산과 실측치의 비교를 나타내고 있다. T-P와 T-N에 대해서는 년평균치, COD농도에 대해서는 여름철 평균치를 이용하였다. 비교지점으로는 각각 장기간의 현지관측 data가 존재하는 지점을 선택하였으며, 지점 A와 G에 대하여 T-P, COD, T-N 농도의 관측치와 계산치를 비교하였다. 실측치는 오사카 수산시험장에서 실시하고 있는 淺海定線調査의 data 및 공공용수역 수질조사 data를 이용하였다. Fig. 7(a)에 나타난 1975~1979년의 천해정선조사의 관측점 A의 T-P농도는 크게 변동하고 있지만, 1975년에서 1993년의 약 20년간의 장기적인 경향으로는 대략 0.15에서 1.0 mg/l 정도까지 감소해 오고 있다고 말할 수 있다. 한편, 계산결과는 1970년대에 농도가 peak에 이르고, 그 후에 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 만 안쪽이나 연안역에서는 계산치가 관측치의 거의 그 중앙을 통과하고 있는 것을 알 수 있다. 만 입구지점에서도 계산치가 약간 높게 나타나고 있지만 농도차는 0.01 mg/l 정도이며, 오사카만 전체로 볼 때 양호하게 재현하고 있다고 할 수 있다.

COD에 대해서는 여름철의 실측치와 계산치의 비교를 실시하였다. 계산치는 1965년부터 서서히 증가하여 1975년에 peak에 도달한 뒤 감소하고 있다. 특히, 1977년부터 1980년에 걸쳐 크게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 실측치와 비교해 보면 절대치의 차이는 있지만, COD 농도의 peak와 증가 및 감소 경향은 잘 재현하고 있다고 할 수 있다.

T-N에 대해서는 계산치가 1965년부터 1975년에 걸쳐 크게 증가하고, 1975년 이후에도 서서히 계속해서 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이는 T-N의 삭감정책이 실시되지 않았기 때문으로 생각된다. 또한, 실측치가 9년간의 data 밖에 없기 때문에 계산치와 충분히 비교할 수 없지만, 계산치는 만 안쪽부에서 1 mg/l, 만입구부에서는 0.5 mg/l로 나타나 실측치와 거의 일치하고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 저니 내의 용출기구를 고려하여 해수와 저니를 일체화한 수질·저질 모델을 개발하고, 모델의 재현성과 적용성을 검증하였다. 그 결과 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 개발한 수질·저질모델의 주요 parameter에 대한 민감도분석 결과, 질소·인 모두 해수로부터 유기

물의 침강속도 및 분해속도가 용출속도에 대해 민감도가 높으며, 인에 대해서는 탈착계수가 용출속도에 대해서 민감도가 높은 것으로 나타났다. 또한, 질소에 대해서는 탈질속도가 용출속도에 대하여 민감도가 높고, 負(-)의 상관관계에 있는 것을 알 수 있었다.

(2) 모델의 재현성을 검증하기 위해, 오사카만에서 저니로부터의 DIP(용존무기태 인) 용출속도를 계산하였다. 계산결과에 의하면 용출속도의 계절변화, 특히 용존산소 농도가 낮고 수온이 높은 여름철에 걸쳐, 인의 용출속도가 급격히 높아지는 현상을 잘 재현할 수 있었다.

(3) 오사카만에 있어서 수질의 장기계산을 실시한 결과, 부하량의 변화에 따른 질소·인, COD 농도의 증가 및 감소 경향이나 수질의 장기변동을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- Horie, T. and Hosokawa, Y. (1984). Modeling on the behavior of phosphorus in sea bed. Report of the Port and Harbor Research Institute, 23(2).
- Jorgensen, S.E. and Jacobsen, O.S. (1975). A submodel for anaerobic mud-water exchange of phosphate. Ecological Modeling, 1, 133-146.
- Kamp-Nielsen, L. (1975). A kinetic approach to the aerobic sediment-water exchange of phosphorus in lake Esrom. Ecological Modeling, 1, 153-160.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with primitive equations, 1, The basic experiment. Monthly Weather Review, 91(3), 99-164.
- 城久 (1989). 大阪における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について. 大阪府水産試験場研究報告, 第7, 28-38.
- 中辻啓二 (1994). 大阪における残差流系と物質輸送. 水工学シリーズ 94-A-9, 土木學會水理委員會, A9, 1-28.
- 岩佐義朗, 井上和也, 阿部徹 (1983). 琵琶湖湖流の3次元解析. 京都大學防災研究所年報, 26(B-2), 531-534.
- 細見正明 (1987). 湖沼底泥からの窒素・燐溶出とその制御に関する研究.
- 堀江毅, 細川恭史 (1984). 海底中のリンの舉動モデルについて. 港技術研究所報告, 第23卷, 第2.
- 山根伸之 (1998). 大阪の流動構造と生態系を考慮した水質予測モデルに関する研究. 大阪大學大学院工學研究科博士論文.
- 韓 銅珍, 丸谷道彦, 中辻啓二 (2000). 閉鎖性内灣における水質・底質モデルの構築とその検証. 海岸工學論文集, 47,



1091-1095.

建設省 (1973-1997). 流量年表. 建設省 河川局.

大坂府 (1983-1997). 公共用水域 水質測定 結果報告.

兵庫縣 (1983-1997). 公共用水域 水質測定 結果報告.

大坂府 水産試験場 (1973-1997). 淺海定線調査. 大坂府 水産

試験場 事業報告.

大坂府 (1988-1997). 公共用水域 水質測定 結果報告.

---

Received December 2, 2004

Accepted June 14, 2005