

## 인천해안의 수질관리를 위한 오염부하량 할당에 관한 연구

김소연 · 최정현 · 나은혜 · 박석순<sup>†</sup>

이화여자대학교 공과대학 환경학과

(2004년 10월 1일 접수, 2004년 12월 18일 채택)

### A Waste Load Allocation Study for Water Quality Management of the Incheon Coastal Environment

So-Yeon Kim · Jung-Hyun Choi · Eun-Hye Na · Seok-Soon Park<sup>†</sup>

Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

**ABSTRACT** : This paper presents a waste load allocation study for the Incheon coastal environment, where a computer model, called AQUASEA, was applied. A finite element mesh was constructed and refined to cover the complicated geometry of Incheon coastal sea. The tidal height at 13 places of Incheon coastal boundary and flow of the Han River were given as an input condition to the tidal simulation. All pollution sources that discharge into Incheon coast were given as input data to the water quality simulation. The modeled parameters include tidal flow and COD(Chemical Oxygen Demand). The model was calibrated and verified with the field measurements. The model results showed reasonable agreements with field measurements in both tidal flow and water quality. Systems analysis showed that the pollution load from the Han River caused recognizable impacts on the water quality of Incheon coast from Yeomhwa waterway to northern area of Younghungdo. The loads from Incheon City affected water quality from the area below Youngjongdo to the area above Jawalldo. The discharge from the Sihwa Lake caused discernible impacts on the coastal zone from the dike outlet to the Incheon harbor, and pollution loads from Kyungkido affected the sea near the Oido. An effective water quality management plan was developed from the waste load allocation analysis of the validated model, that the maximum waste loads can be discharged without violating the water quality standard given in the Incheon coastal environment.

**Key Words** : Coastal Environment, Water Quality Modeling, Systems Analysis, Waste Load Allocation Analysis, Water Quality Management Plan

**요약** : 본 논문은 인천 해안에서 AQUASEA 모델을 적용한 오염부하량 할당 연구를 제시한다. 인천 해안의 복잡한 지형을 표현하기 위하여 유한요소격자망을 구성하였으며, 인천 해안 경계 지역의 13개 지점의 조위와 한강 유량이 조석조위 시뮬레이션을 위한 입력 조건으로 주어졌다. 또한, 해안으로 유입되는 모든 오염원의 부하량이 수질 시뮬레이션 입력 조건으로 주어졌다. 시뮬레이션된 변수는 조류와 화학적 산소요구량이며, 실측값을 이용하여 보정 및 검증되었다. 모델 결과는 대부분의 측정 지점에서 실측값과 적절한 일치를 이루었다. 시스템 분석 결과 한강에서 유입되는 오염물질은 염화수소에서부터 영종도 북쪽 해역까지 수질에 영향을 미치며, 인천시에서 배출되는 오염물질은 영종도 아래에서부터 자월도 위쪽 해역까지 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 시화호에서 방류되는 물은 배출 수문에서부터 인천항까지의 수질에 영향을 보이며, 경기도 연안에서 배출되는 오염물질은 오이도 부근 해역의 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 타당성이 검증된 모델의 오염부하량 분석을 통하여 효과적인 수질관리대책을 수립하였으며, 여기서 인천 해안의 수질기준치를 유지하면서 허용될 수 있는 오염부하량을 제시하였다.

**주제어** : 해양 환경, 수질모델, 시스템분석, 오염부하량 분석, 수질관리방안

## 1. 서론

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있으며, 국토의 3배에 달하는 넓은 대륙붕과 12,700 km에 이르는 긴 해안선을 갖고 있는 전형적인 반도 국가이다. 지금까지 많은 공업단지 및 발전소가 해안에 건설되었고 매립과 항만건설과 같은 연안 개발이 계속되어 왔다. 그러나 이러한 개발에 필연적

으로 수반되는 생태계 파괴와 오염원 증가와 같은 환경문제에 대한 사전 예방적인 관리 노력이 부족하여 해양 환경은 점점 악화되고 있으며 해역의 생산성은 저하되어 가고 있는 실정이다.

일반적으로 해역의 수질오염문제는 일정한 행정구역 내에만 국한되는 것이 아니라 행정구역의 경계를 초월하여 발생하기 때문에 광역적 대처가 요구된다. 따라서 적절한 수질관리방안을 수립하기 위해서는 비교적 넓은 범위에 걸친 오염원과 수질 조사가 요구되며, 이들 사이의 원인과 결과 관계에 대한 규명이 이루어져야 한다. 또한 해안선이

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: ssp@ewha.ac.kr  
Tel: 02-3277-3546

Fax: 02-3277-3275

복잡하고 조석간만의 차가 심한 우리나라 서해안과 같은 해역의 경우 수질을 정확히는 가장 중요한 기작은 외해와의 해수 교환이다.<sup>1)</sup> 따라서 이러한 해역에서의 수질을 효과적으로 관리하기 위해서는 유입된 오염물질이 조석현상에 의해 정화되는 과정에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해서는 넓은 해역에 조석조류현상을 고려한 수질모델을 적용하고 연안에 위치한 오염원에 따른 수질변화를 예측하여 적절한 해양관리 방안을 수립해야 한다.<sup>2)</sup>

한강과 임진강이 서해로 유입되는 하구에 위치한 인천 연안은 1882년 개항 이래 항만 개발과 해안 간척공사 등 계속적이 개발이 이루어져 왔다. 최근 영종도, 김포, 송도 연안에서 추진되어온 대규모 간척사업으로 인하여 해안선이 크게 변화하였으며 장래에도 지속적인 해안 개발이 이루어질 것으로 예상된다. 현재 연안에 위치한 도시지역과 해안선을 따라 밀집되어 있는 임해공업단지로부터 많은 양의 오염물질이 바다로 유입되고 있으며, 뿐만 아니라 한강이나 시화호 등으로부터 많은 양의 오염물질이 인천 해역으로 배출되고 있다.<sup>3)</sup>

본 논문에서는 전산 모델을 인천 해역에 적용하여 조석조류 현상과 수질 분포를 재현하고 이를 이용하여 해역으로 유입되는 각 오염원별 기여도를 분석하였다. 또한, 현재 해역기준등급을 만족하기 위해 필요한 오염부하량 감량 수준을 제시하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구대상

인천항은 북위 37° 28', 동경 126° 36'에 위치한 상업항으로 항구 내 정박 및 하역시설 설치로 인하여 해안선이 매우 복잡하다. 반일주조류가 우세한 왕복성 조류의 규칙적인 1일 2회의 창·낙조류가 일어나고 일조부등이 작은 편이다. 창조류는 수로의 동측에서 낙조류는 수로의 서측에서 강하게 흐르고 항류는 남서방향으로 0.1 km 내외이다. 본 연구에서는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 인천 연안을 포함하여 시화호 연안과 남서쪽으로 덕적도 부근까지 남동쪽으로 영흥도 하단 부근까지를 대상 해역으로 설정하였다. 연구대상 해역에서 대조승(Sp. rise)과 소조승(Np. rise)은 각각 8.6과 6.4 m이며, 항내수심은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 평균해면(MSL: Mean Sea Level)을 기준으로 약 2.0에서 약 20 m로 변화한다.<sup>4)</sup>

### 2.2. 모델 개요

본 연구에서 사용된 AQUASEA 모델은 1992년 Vatnaskil Consulting Engineers에서 개발한 2차원 수리 및 수질 모델로 사용자에 의한 모델 활용 및 모델 결과의 공간적인 표현을 용이하게 하기 위하여 다양한 그래픽 전처리기와 후처리가 포함되어 있다.<sup>5)</sup> AQUASEA 모델은 갤러킨 잔차가중법(Galerkin weighted residuals)을 이용한 유한요소법(finite element method)으로 계산을 하기 때문에 복잡한 해안선을

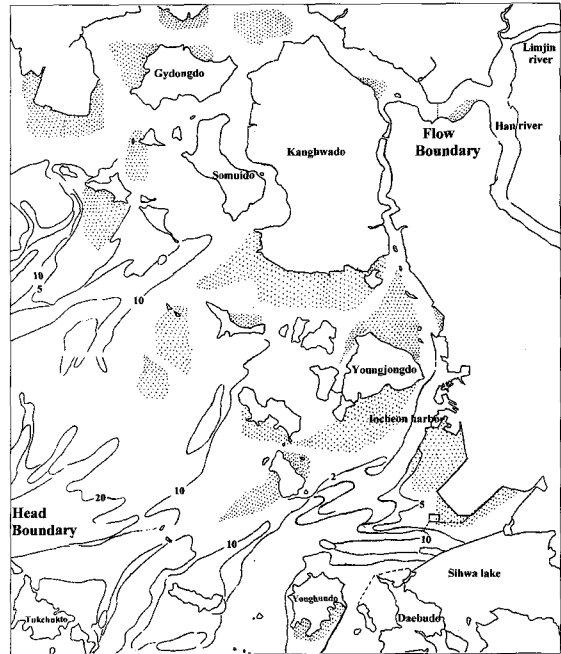


Fig. 1. Study area.

표현하기에 용이하고, 조간대 해역을 고려할 수 있으며 조위변화가 크고 조류속이 빠른 해역에 적용하기 적합하다.<sup>6,7)</sup>

수리 모델은 수심, 바다면 거칠기 계수, 경계 조건 등에 기초하여 동적인 상태의 조위 및 조속 변화를 계산할 수 있어 항만과 하구뿐만 아니라 하천과 수심이 얇은 호수의 수체 이동 방향과 세기를 시뮬레이션할 수 있다.<sup>8-10)</sup> 지배방정식은 물질수지(mass balance)원리에 바탕을 둔 연속방정식(continuity equation)과 운동량 수지(momentum balance)원리에 기초한 운동방정식(equation of motion)이다.<sup>5)</sup> 연속방정식에서 시간에 따른 조위 변화는 다음에 제시한 식 (1)에 의해 계산되며, x, y 방향에 대한 운동방정식은 각각 식 (2)와 (3)과 같다.

$$\frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} + \frac{\partial\eta}{\partial t} = Q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f v - \frac{g}{HC^2} (u^2 + v^2)^{1/2} u + \frac{k}{H} W_x |W| - \frac{Q}{H} (u - u_0) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \\ -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - f u - \frac{g}{HC^2} (u^2 + v^2)^{1/2} v + \frac{k}{H} W_y |W| - \frac{Q}{H} (v - v_0) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $f$ (Coriolis parameter) =  $2\omega \sin \varphi$ ,  $k$ (wind shear stress parameter) =  $\frac{\rho_a C_D}{\rho}$ ,  $H = h + \eta$ ,  $h$  = 평균 수심(m),  $\eta$  = 수위 변화(m),  $H$  = 총 수심(m),  $u$  = x방향으로의 속도 성분(m/sec),  $v$  = y방향으로의 속도 성분(m/sec),  $t$  = 시간(sec),  $Q$  = 유입수량(m<sup>3</sup>/sec),  $g$  = 중력가속도(m/sec<sup>2</sup>),  $\omega$  = 지구 가속도(sec<sup>-1</sup>)( $7.2 \cdot 10^{-5}$ ),  $\varphi$  = 위도(degree),  $C$  = 바닥

면 거칠기 계수(Chézy bottom friction coefficient,  $m^{1/2}/sec$ ),  $\rho_a$  = 공기 밀도( $kg/m^3$ ),  $\rho$  = 유체 밀도( $kg/m^3$ ),  $C_D$  = 바람 지체 상수(wind drag coeff.),  $W_x$  = x방향으로의 바람 속도( $m/sec$ ),  $W_y$  = y방향으로의 바람 속도( $m/sec$ ),  $|W|$  = 바람 속도( $m/sec$ ),  $u_0$  = x방향으로의 유속( $m/sec$ ),  $v_0$  = y방향으로의 유속( $m/sec$ )이다.

수질 모델은 수리 모델을 통한 수체의 이동 변화 결과와 확산 기작에 기초하여 오염부하량과 위치 그리고 사멸계수 등의 자료를 바탕으로 시간에 따른 수질 분포를 예측한다. 수질 모델의 지배방정식인 2차원 이류확산식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (HD_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (HD_y \frac{\partial c}{\partial y}) - Hu \frac{\partial c}{\partial x} = H \frac{\partial c}{\partial t} + \lambda_v Hc + \lambda_v - Q(c_0 - c) \quad (4)$$

여기서,  $c$  = 농도,  $u$  = 속도( $m/sec$ ),  $D_x$  = longitudinal dispersion coeff. ( $m^2/sec$ ),  $D_y$  = transversal dispersion coeff. ( $m^2/sec$ ),  $\lambda_v$  = 부패 지수 사멸계수( $sec^{-1}$ ) 그리고  $c_0$  = 주입 수의 농도이다. 모델 구성 개요를 Fig. 2에 제시하였다.

### 2.3. 모델 적용

연구대상 해역을 AQUASEA 모델에 적합하도록 Fig. 3과 같이 3,933개의 node로 유한요소망을 구성하였다.<sup>5,11)</sup> 수심의 변화가 크고 상세한 지형 표현을 요구하는 해안선과 조간대 부근은 격자를 조밀하게 구성하였고 수심이나 수체 흐름 특성이 비슷한 해역부근은 비교적 크게 격자를 구성하였다. 수심자료는 각 element에 입력되었으며, 해수가 유입되는 외해 경계의 node에는 수위변화에 대한 경계조건이 연안으로 유입되는 하천인 한강의 유입지점 node에는 유량 변화에 대한 경계조건을 입력하였다. 수위변화 경계조건은 인천항 부근 13개 조위 관측소의 수위변화 값을 사인함수로 재현하여 입력하였다. 수리모델 보정을 통해 바닥면 거칠기 계수와 확산계수를 각각 20~60, 400~4,000  $m^2/sec$ 으로 결정하였다. 사용된 값은 해역에서 일반적으로 나타나는 값과 비교적 적절히 일치한다.<sup>12~15)</sup> Coriolis force는 범위가 넓은 대양에서만 해수 이동에 주요 영향을 미치게 되므로 본 모델에서는 무시되었다.<sup>16,17)</sup>

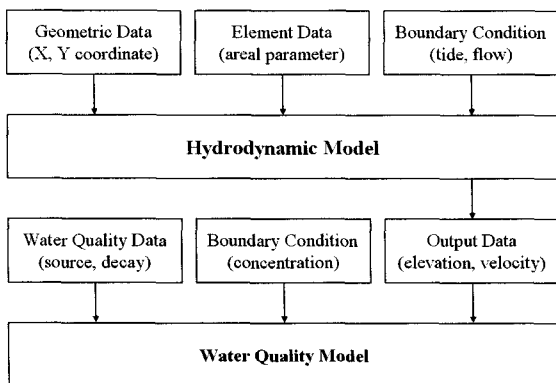


Fig. 2. Schematic description of model structure.

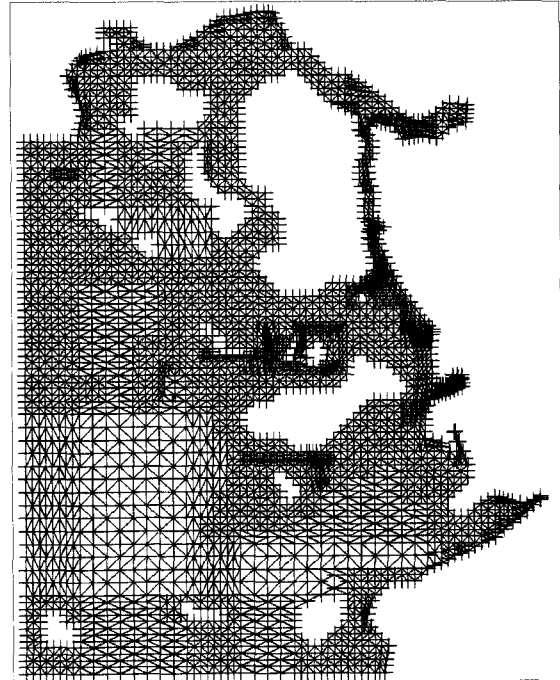


Fig. 3. Finite element mesh.

수질 시뮬레이션을 위한 수리 현상은 한강 하구의 순유량과 외해역의 13개 조위관측소의 평균 조위값으로 경계 조건을 설정하고 보정된 바닥면 거칠기 계수와 확산계수값을 이용하여 재현하였다. 적용 수질은 해양 수질을 대표할 수 있는 화학적 산소요구량(COD; Chemical Oxygen Demand)으로 하였다. 수질 모델 수행을 위한 경계 조건은 수리 모델과 동일하게 설정하였으며, 한강 하구와 외해의 COD 농도는 측정값에 기초하여 각각 7 mg/L과 1~2 mg/L로 유지되는 것으로 설정하였다. 한편 연안으로 유입되는 7개 유수지의 유량과 4개의 환경기초시설, 시화호의 방류수량을 평수기 유량값으로 연속 유입되는 것으로 가정하였다(Table 1). 또한 연안으로 유입되는 오염원은 총 20여 개로 구분하

Table 1. Fresh water inflow in Incheon coastal area

Type	Name	Average Inflow ( $m^3/sec$ )
Lake	Sihwa lake	28.60
	Anam	0.27
Pond	Jangdo	0.39
	Ildo	0.17
	Chungrado	0.68
	Incheon iron manufacture	3.47
	Namdong industrial complex	0.46
	Jangsuchun	0.15
Sewage Treatment Plant & Night Soil Treatment Plant	Yuldo	0.055
	Sungki	2.10
	Hakik	1.91
	Sihwa	2.04

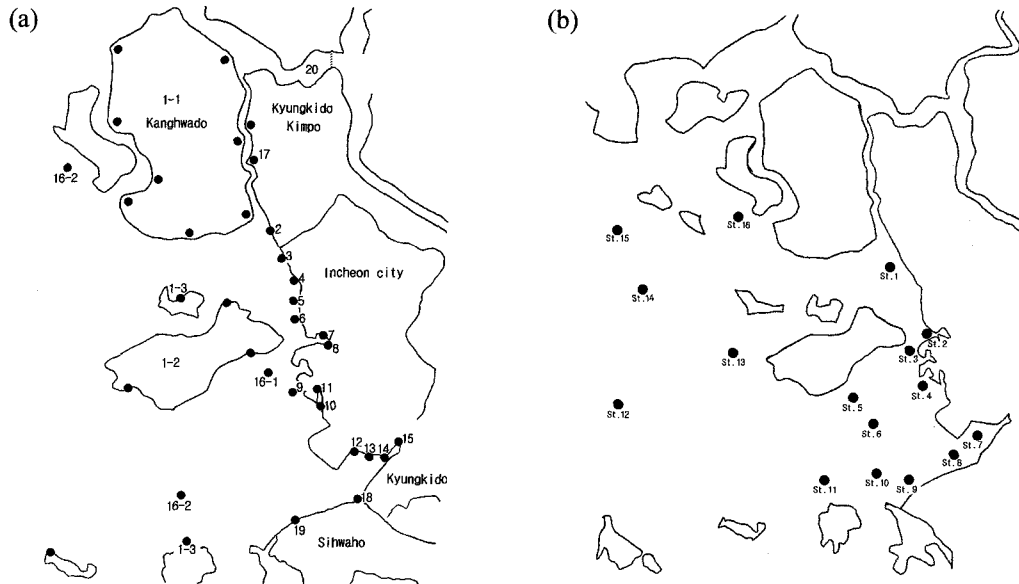


Fig. 4. Location of (a) pollution sources and (b) sampling sites.

여 입력하였으며, 이들 오염원의 유입지점과 부하량은 각각 Fig. 4(a)와 Table 2에 제시한 바와 같다. 수질모델은 수리해가 안정적이라고 판단되는 24시간부터의 수리모델 결과를 이용하였고 수질분포가 정상상태를 보이는 시간인 450시간까지 총 426시간 동안 시뮬레이션을 수행하였다. 안정한 해를 산출하기 위하여 계산시간 간격을 2분으로 설정하였다.

Table 2. Pollution loads in Incheon coastal zone

No.	Loading Site	COD (kg/day)
1. Incheon Islands	1) Kanghwa	8,067.60
	2) Youngjong · Yongyu	553.40
	3) Ongjin	255.30
2.	Anamdo pond	402.50
3.	Jangdo pond	1,152.40
4.	Ildo pond	451.50
5.	Chungrado pond	1,614.60
6.	Yuldo excretion treatment	133.50
7.	Gajwa(direct)	927.80
8.	Incheon iron manufacture	8,250.00
9.	Hakik(direct)	1,808.96
10.	Dongyang waste water treatment(direct)	550.00
11.	Hakik drainage	9,716.50
12.	Sungki sewage treatment	1,875.72
13.	Namdong industrial complex pond	1,380.00
14.	Sungki(direct)	1,567.50
15.	Jangsuchun	1,085.20
16.	Oceanic facilities	20,620.48
17.	Kimpo city	1,680.60
18.	Sihwa sewage treatment	8,594.40
19.	Sihwa lake	38,306.80
20.	Han river	156,847.10

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 모델 보정 및 검증

AQUASEA 모델의 보정을 위하여 인천보건환경연구원에서 측정된 1997년 3월의 측정자료를 이용하였으며, 해역 내 16개 측정 지점의 위치는 Fig. 4(b)에 제시된 바와 같다. 수질 모델의 보정 결과산출된 사멸계수는  $4.0 \times 10^{-7} \text{ sec}^{-1}$ 이며, 전체 측정지점에서 측정값과 모델 예측값의 비율 값으로 보정된 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 모델 보정 결과 총 16개의 지점 중 영종도 북방(St.1), 석모도 서방(St.16), 장봉도 서방(St.15), 인천 남항(St.4), 영종도 동남방(St.6), 무의도 남방(St.11), 덕적도 북방(St.14)에서는 모델값과 측정값의 차이가  $-0.12 \sim 0.34 \text{ mg/L}$  이하로 거의 일치함을 보였으며, 만석동과 영종도 중간(St.3), 신공항 건설(St.5), 오이도 북방(St.7) 지점에서는 모델값과 측정값의 차이가  $1 \text{ mg/L}$  이하로 비교적 유사한 값을 보였다. 그러나, 화수부두 부근(St.2) 지점에서는 모델값이 약  $4 \text{ mg/L}$ 로, 실제 측정값인  $5.2 \text{ mg/L}$ 보다 낮게 계산되었고, 큰가리섬 서북방향(St.8), 대부도 북단(St.9), 영흥도 북방(St.10), 덕적도 북방(St.12) 지점에서는 모델값이 각각  $2.4 \text{ mg/L}$ ,  $2.3 \text{ mg/L}$ ,  $2.1 \text{ mg/L}$ ,  $1.6 \text{ mg/L}$ 로 측정값인  $1.4 \text{ mg/L}$ ,  $1.2 \text{ mg/L}$ ,  $1.1 \text{ mg/L}$ ,  $1.0 \text{ mg/L}$ 보다 다소 높게 예측되었다.

보정 과정에서 산출된 사멸계수를 그대로 적용하여 모델 검증을 수행하였으며, 검증을 위한 수질 자료는 Fig. 3에 제시된 16개 지점에서 1997년 5월과 11월에 측정된 수질 자료를 이용하였다. 모델의 검증 결과는 Fig. 5(b)와 5(c)에 제시하였다. 97년 5월의 측정값을 이용하여 검증한 결과 대부분의 측정 지점에서는 모델값과 측정값의 차이가  $\pm 0.5 \text{ mg/L}$  이하로 비교적 일치하는 값을 보였다. 그러나 오이도 북방(St.7) 지점에서 모델값이  $2.5 \text{ mg/L}$ 로 측정값인  $3.2 \text{ mg/L}$

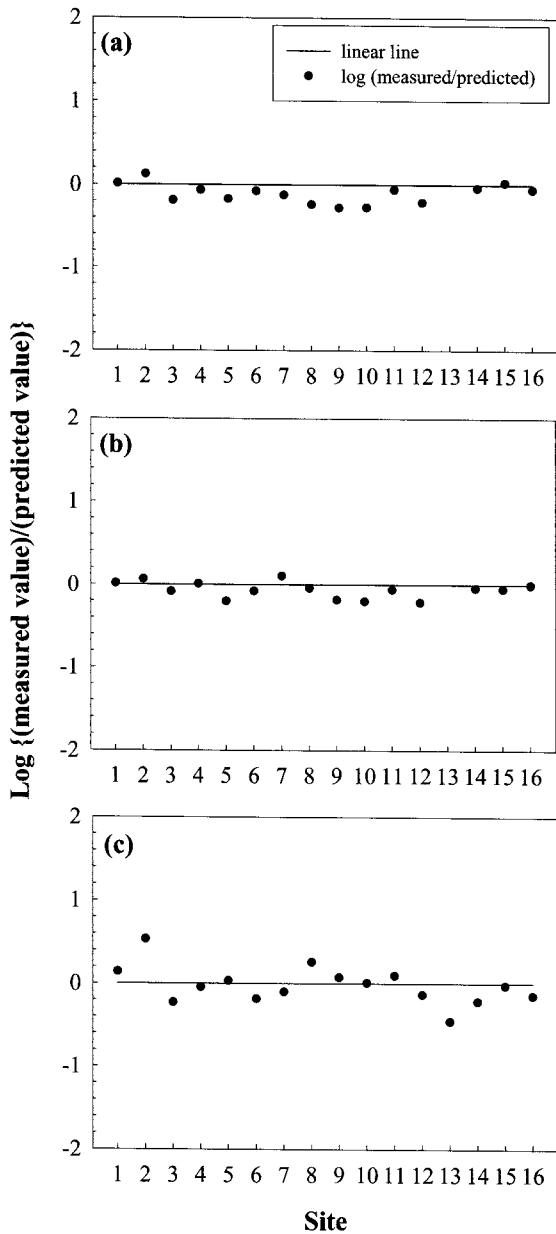


Fig. 5. Model calibration and verification results - (a) model calibration(97/3), (b) model verification(97/5), (c) model reverification (97/11).

L보다 약간 낮게 계산되었으며, 신공항 건설(St.5)과 대부도 북단(St.9) 지점에서는 모델값이 2.2 mg/L, 2.3 mg/L로 측정값인 1.4 mg/L, 1.5 mg/L보다 약간 높게 계산되었다. 97년 11월 경우의 측정값을 이용한 모델 검증 결과 모델값과 측정값은 다소 차이를 보였다. 화수부두부근(St.2) 지점에서의 모델값은 3.9 mg/L로 측정값인 13.3 mg/L보다 매우 낮게 계산되었고, 용유도 서방(St.13) 지점에서는 모델값이 2.6 mg/L로 측정값인 0.9 mg/L보다 높게 계산되었다. 그러나 인천 남항(St.4), 신공항건설(St.5), 오이도 북방(St.7), 대부도 북단(St.9), 영흥도 북방(St.10), 장봉도 서방(St.15) 지점에서는 모델값과 측정값의 차이가 ±0.5 mg/L이하로 비교적 일치하는 값을 나타내었다.

### 3.2. 시스템 분석

인천연안으로 유입되는 주요 오염원들은 1) 한강하구에서 유입되는 서울 등의 수도권 오염원, 2) 인천광역시에서 발생하는 오염원, 3) 김포, 시흥, 안산시 등 일부 경기도 오염원, 4) 시화호 방류에 의한 오염원으로 크게 네 가지로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이들 오염원이 인천 연안 수질에 미치는 오염기여도를 분석하기 위하여 각 오염원들이 제외되었을 경우 연안 수질의 변화를 측정 지점별로 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다.

한강 오염원이 제외되었을 경우 영종도 북방(St.1) 지점에서의 COD 농도가 3.7 mg/L에서 1.6 mg/L로 감소되어 수질 개선이 가장 두드러지게 나타났으며, 화수부두 부근(St.2)과 만석동과 영종도 중간(St.3) 지점에서의 COD 농도는 3.9 mg/L와 3.4 mg/L에서 2.4 mg/L와 2.2 mg/L로 약 1.0~1.5 mg/L 정도 감소되는 것으로 나타났다. 영종도 아래 해역에서 영흥도 북방 해역에서의 COD 농도는 2.1~2.5 mg/L에서 1.9~2.3 mg/L로 약 0.2~0.4 mg/L 정도 감소되어 미미하나마 수질이 개선됨을 보였다. 즉, 한강에서 유입되는 오염원은 염하수로 아래 해역과 인천항 부근의 수질에 가장 많은 영향을 미치고 있으며, 영흥도 북방 지점까지 그 영향이 나타나는 것으로 예측되었다(Fig. 6(a), Fig. 7).

인천광역시 오염원이 제외되었을 경우에는 화수부두 부근(St.2)과 오이도 북방(St.7) 지점에서의 COD 농도가 3.9 mg/L와 2.5 mg/L에서 3.2 mg/L와 2.0 mg/L로 수질이 가장 많이 개선되는 것으로 나타났다. 이는 화수부두 부근의 수질이 인천 재철 유수지에서 유입되는 오염원의 영향을 많이 받고, 오이도 북방에서 대부도 북단 해역의 수질은 승기하수종말 처리장과 남동공단 유수지, 장수천 등의 오염원의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 사료된다. 만석동과 영종도 중간(St.3) 지점의 COD 농도는 3.4 mg/L에서 3.2 mg/L로 감소되는 것으로 나타났고, 영종도 아래 해역에서 영흥도 북방 해역까지의 COD 농도는 평균 2.6 mg/L에서 2.2 mg/L로 약 0.4 mg/L가 감소하는 것으로 예측되었다(Fig. 6(b), Fig. 7).

경기도 오염원이 제외되었을 경우에는 오이도 북방(St.7)과 큰가리섬 서북방향(St.8) 지점에서의 COD 농도가 2.5 mg/L와 2.4 mg/L에서 2.3 mg/L와 2.3 mg/L로 약 0.2 mg/L정도 개선되었으며, 나머지 해역에서는 비슷한 수질분포를 보였다(Fig. 6(c), Fig. 7). 시화호 오염원을 제외했을 경우에는 시화호 근해(St.8, St.9)와 오이도 북방(St.7) 지점의 COD 농도가 평균 2.4 mg/L에서 2.1 mg/L로 약 0.3 mg/L정도 감소하는 것으로 나타났으며, 영종도 아래 해역의 COD 농도도 약 0.2 mg/L 정도 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6(d), Fig. 7).

결과적으로 한강 오염원은 연안으로 유입되는 오염원 중 유입부하량 비율(59%)이 가장 클 뿐만 아니라, 공간적으로도 가장 넓은 해역의 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 시화호 오염원은 방류지점 부근과 오이도 북방

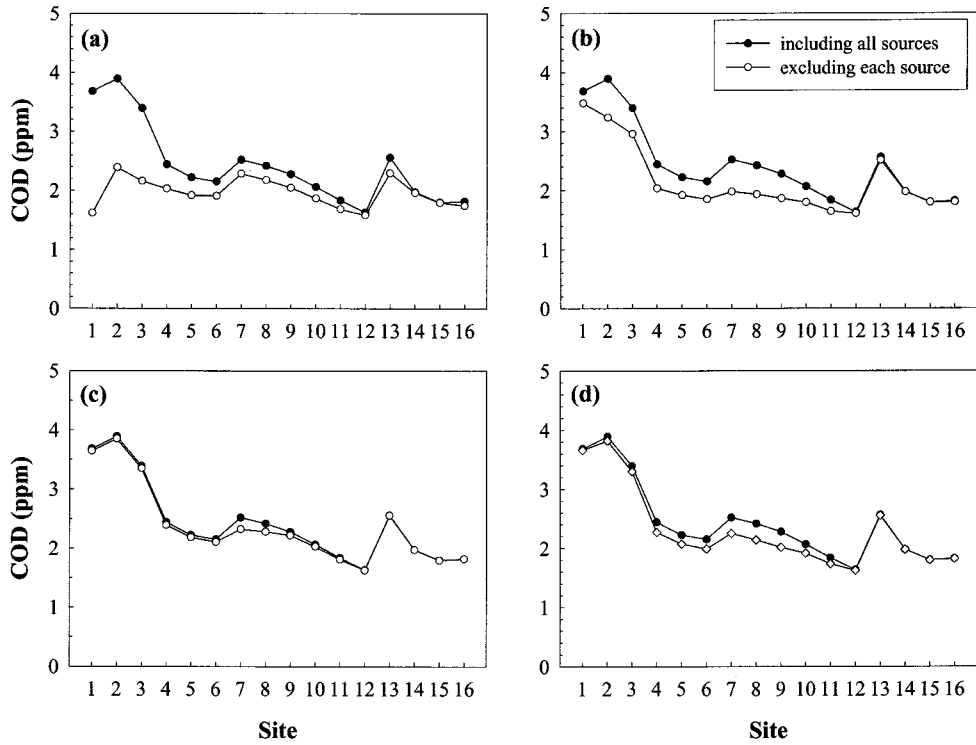


Fig. 6. Distribution of water quality excluding each pollution source - (a) Han River source, (b) Incheon city source, (c) Kyungkido source, (d) Sihwa source.

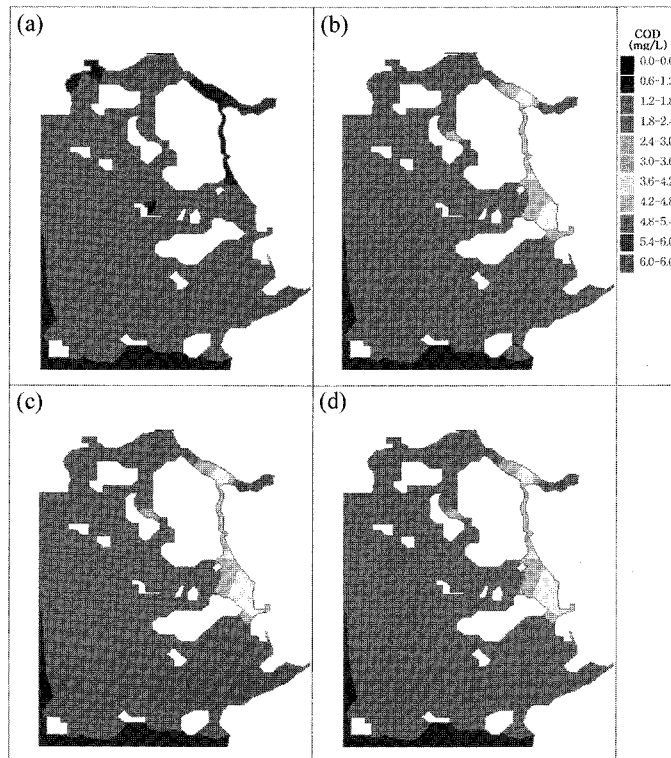


Fig. 7. Impact analysis of pollution loads on the coastal water quality - (a) excluding loads from the Han river, (b) excluding loads from the Incheon city, (c) excluding loads from the Kyungkido, (d) excluding loads from the Sihwa lake.

지점뿐만 아니라 인천 남항 전면에서 무의도 남방까지 영향이 나타났다. 반면 경기도 오염원은 시화 하수 종말 처

리장의 영향으로 인하여 상대적으로 좁은 해역에서만 그 영향이 나타나는 것으로 예측되었다. 그리고 인천광역시 오

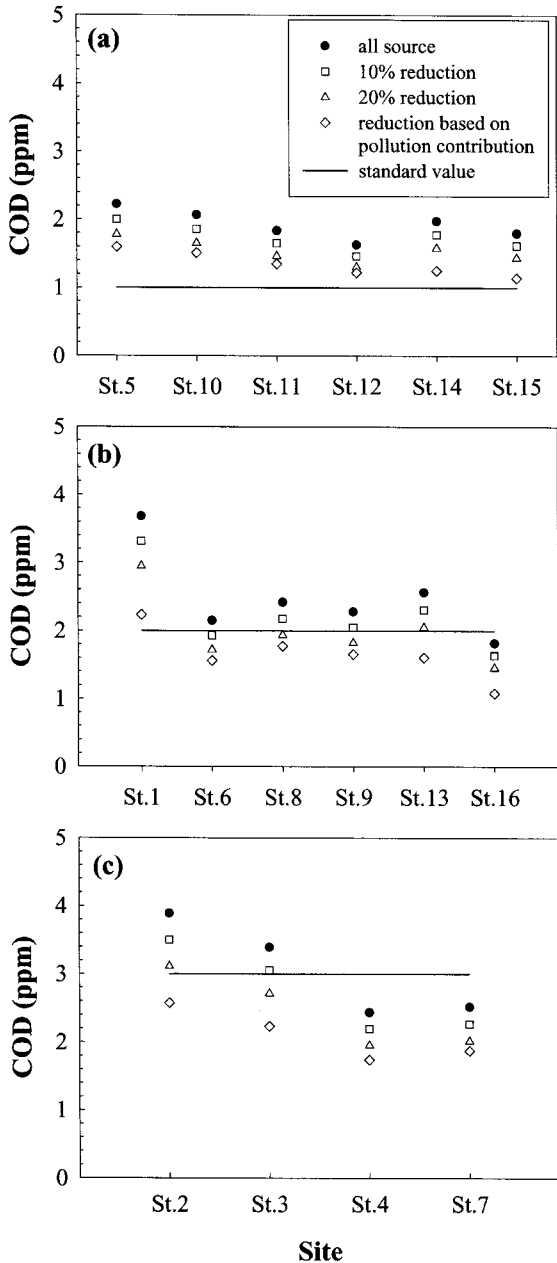


Fig. 8. Prediction of water quality improvement after plan 1, 2, 3 - (a) rank I, (b) rank II, (c) rank III.

염원은 영종도 아래 해역에서 자월도 위해역까지 연안 수질에 전반적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 인천연안의 수질을 향상시키기 위해서는 한강 하구의 수질개선과 인천제철 유수지, 학익 배수구, 해양시설 등의 인천광역시 오염원 및 시화호의 방류수질 관리가 필수적이라고 판단된다.

### 3.3. 오염부하량 분석

본 연구에서는 현재 해역수질환경기준을 초과하고 있는 인천 연안의 COD 농도가 수질기준을 만족시킬 수 있는 오염부하량 삭감 수준을 결정하기 위하여 시나리오 분석을 수행하였다. 시나리오 1과 2에서는 모든 오염원으로부터의 부하량이 각각 10%와 20%씩 동일하게 삭감되었다고 가정

하였으며, 시나리오 3에서는 앞서 분석된 오염 기여도에 따라 오염원별로 삭감 수준을 다르게 설정하였다. 시나리오 분석 결과는 오염부하량 삭감에 따른 16개 측정지점에서의 COD 농도 변화를 I, II, III 해역 등급별로 Fig. 8에 제시하였으며, 전체 대상 해역에서의 COD 농도 변화를 Fig. 9에 제시하였다.

모든 오염원의 부하량을 10% 삭감하는 경우 II 등급 해역인 영종동 동남방(St.6)과 대부도 북단(St.9) 지점에서의 COD 농도가 1.9 mg/L와 2.1 mg/L로 감소하였으며, III 등급 해역인 영종도 중간(St.3) 지점에서의 COD 농도가 3.1 mg/L로 감소하여 수질기준을 비교적 만족시키는 것으로 예측되었다. 그러나 I 등급 해역의 모든 지점과 II 등급 해역의 영종도 북방(St.1)과 큰가리섬 서북방향(St.8), 용유도 서방(St.13) 지점 그리고 III 등급 해역의 화수부두 부근(St.2) 지점에서는 여전히 기준값을 초과하고 있는 것으로 나타났다. 특히 영종도 북방(St.1)해역은 약 3.3 mg/L로 기준값을 훨씬 초과하는 높은 농도를 보이는 것으로 예측되었다.

전체 오염부하량을 20%씩 동일하게 삭감하였을 경우 II 등급 해역에서는 영종도 북방(St.1) 지점을 제외한 전 지점에서 수질기준을 만족하였으며, III 등급 해역에서의 COD 농도는 2.0~3.1 mg/L로 기준값을 비교적 만족시키는 것으로 나타났다. 반면 전체 오염부하량을 20% 삭감하는 경우에도 I 등급 해역인 신공항건설 부근(St.5), 영흥도 북방(St.10), 무의도 남방(St.11), 덕적도 북방(St.14), 장봉도 서방(St.15) 지점에서의 COD 농도는 1.3~1.8 mg/L로 여전히 기준값을 초과하고 있으며, II 등급 해역의 영종도 북방(St.1) 지점에서의 COD 농도도 2.9 mg/L로 여전히 수질기준을 초과하는 것으로 예측되었다.

Table 3. Measured data in study area - COD(ppm)

Site No.	Place	COD (97/03)	COD (97/05)	COD (97/11)
1	North Youngjongdo	3.8	3.8	5.1
2	Pier Hwasu	5.2	4.5	13.3
3	Between Mansukdong and Youngjongdo	2.2	2.8	2.0
4	South Incheon harbor	2.1	2.5	2.2
5	Around airport construction	1.5	1.4	2.4
6	South-eastern Youngjongdo	1.8	1.8	1.4
7	North Oido	1.9	3.2	2.0
8	Western Gari island	1.4	2.2	4.4
9	North Daebudo	1.2	1.5	2.7
10	North Younghungdo	1.1	1.3	2.1
11	South Mueido	1.6	1.6	2.3
12	North Tukchukto (1)	1.0	1.0	1.2
13	Western Yongyudo	-	-	0.9
14	North Tukchukto (2)	1.8	1.8	1.2
15	Western Jangbongdo	1.9	1.6	1.7
16	Western Seokmodo	1.6	1.8	1.3

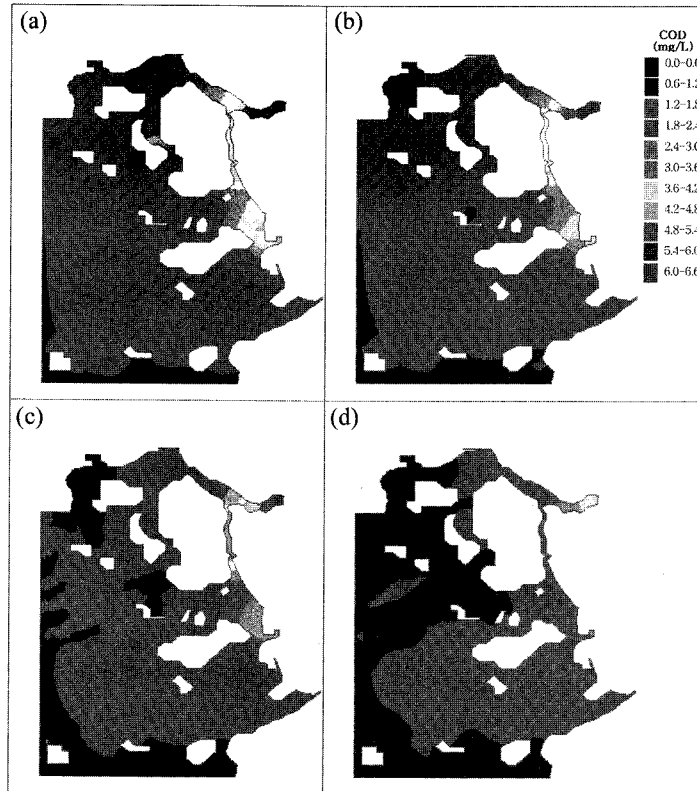


Fig. 9. Predicted water quality based on waste load control plans - (a) including all loads, (b) 10% reduction of all loads, (c) 20% reduction of all loads, (d) reduction based on pollution contribution.

한편 앞서 수행된 오염부하량 분석 결과 영종도 북방(St.1) 해역은 한강 오염원의 영향을, 신공항건설 부근(St.5)은 선박 오염원의 영향을, 영흥도 북방(St.10)과 무의도 남방(St.11) 해역은 시화호 방류수질과 양식장 오염원의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 따라서 시나리오 3에서는 이러한 오염기여도를 고려하여 오염원별로 감량수준을 다르게 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 즉 한강하구와 시화호의 방류수질이 각각 4 mg/L와 10 mg/L로 개선되었다고 가정하였으며, 선박과 어업시설 등 해양 오염원으로부터의 오염부하량은 50% 그리고 나머지 인천광역시의 육상 오염원과 경기도 오염원은 동일하게 10%씩 삭감되었다고 가정하였다. 그 결과 II 등급 해역의 영종도 북방(St.1) 지점에서 COD 농도가 2.2 mg/L까지 감소하였으며, III 등급 해역에서는 전 지점에서 수질기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 또한 I 등급 해역에서도 COD 농도가 1.1~1.5 mg/L로 수질 개선이 이루어지는 것으로 예측되었다.

#### 4. 결론

본 논문은 인천 해안에 AQUASEA 모델을 적용하여 각 유입 오염원들이 연안 수질에 미치는 영향을 알아보고 현 해역등급을 만족시킬 수 있는 오염원의 감량수준을 제시하였다. 인천 연안으로 유입되는 오염원들을 1) 한강하구, 2) 인천광역시, 3) 경기도, 4) 시화호 오염원으로 구분하여 각

오염기여도를 분석해 본 결과, 한강 오염원은 다른 오염원에 비해 유입부하량 비율(59%)도 가장 클 뿐만 아니라, 공간적으로 영흥도 북방해역까지 가장 넓은 해역의 수질에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

인천광역시 오염원은 영종도 아래 해역에서 자월도 위해역까지 연안 수질에 전반적인 영향을 주는 것으로 나타났으며, 경기도 오염원은 큰가리섬 서북 방향의 상대적으로 좁은 해역에서만 그 영향이 나타나는 것으로 예측되었다. 시화호 오염원은 배출구 부근뿐만 아니라 오이도 북방과 인천항 내에까지 영향이 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 연안의 수질을 향상시키기 위해서는 한강 하구의 수질 개선과 인천제철 유수지, 학익 배수구, 해양시설 등의 인천광역시 오염원 및 시화호 방류수질의 관리가 필수적이라고 사료된다.

오염부하량 분석 결과를 이용하여 부하량이나 연안 수질 변동시 적절한 대책을 마련할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 각 오염원 감량에 대한 일반적인 비용함수가 제시된다면 경제성 분석을 통해 해역기준등급을 만족할 수 있는 최적안을 선택할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 교육인적자원부 BK21 신규사업 환경공학분야 프로젝트 지표수 환경관리 시스템 연구의 연구지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.



참고문헌

1. 박정은, 박석순, "폐쇄 해역의 자정능력 평가를 위한 모델 연구," 한국물환경학회지, **19**(3), 247~256(2003).
2. Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., and Brooks, N. H., *Mixing in inland and coastal water*, Academic Press, New York, NY, pp. 483(1979).
3. 인천광역시, 인천앞바다 해양오염 영향인자 조사 및 해양환경 관리방안 연구, pp. 857(1998).
4. 해양수산부 국립해양조사원, 1998년 조석표(한국연안), 서지 제510호, Pub. No. 510(1997).
5. Vatnaskil Consulting Engineers, AQUASEA version 1.5 manual(1992).
6. U.S. Army Corps of Engineers, Generalized computer program system for open-channel flow and sedimentation TABS system: Volume 1, general overview, Vicksburg, MS(1990).
7. U.S. Army Corps of Engineers, Generalized computer program system for open-channel flow and sedimentation TABS system: Volume 2, user's manual, Vicksburg, MS(1990).
8. Heltzel, S. B. and Granat, M. A., Lower James River circulation study, Virginia, evaluation of Craney Island enlargement alternatives, Technical Report HL-88-8, Waterway Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS(1988).
9. Leedertse, J. J., Alexander, R. C., and Liu, S. K., A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: Volume 1, principles of computation, R-1417-OWRR, The Rand Corporation, Santa Monica, CA(1973).
10. Richards, D. R., New Haven Harbor numerical model study, Technical Report HL-88-24, Waterway Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS(1988).
11. 해양수산부 국립해양조사원, 해도 No. 306, No. 311(1996).
12. Park, J. W. and Park, S. S., "Hydrodynamic modeling of tidal changes due to land reclamation in an opened harbor, Pusan, Korea," *J. Environ. Sci. Health*, **A33**(5), 877~890(1998).
13. Park, S. S., Najjar, K. F., and Uchirin, C. G., "A water quality management model for the lakes bay estuarine embayment 2: hydrodynamic tidal model," *J. Environ. Sci. Health*, **A30**(5), 1025~1038(1995).
14. Najjar, K. F., Park, S. S., and Uchirin, C. G., "A water quality management model for the lakes bay estuarine embayment 1: receiving water quality model," *J. Environ. Sci. Health*, **A30**(5), 1001~1023(1995).
15. Bowie, G. L., Pagenhopf, J. R., Rupp, G. L., Johnson, K. M., Chan, W. H., Gherini, S. A., Mills, W. B., Porcella, D. B., and Campbell, C. L., Rates, Constants and Kinetics Formulation in Surface Water Quality Modeling. Second Edition, Report ERA/600/3-85/040, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA(1985).
16. Oey, L. Y., Mellor, G. L., and Hires, R. L., "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part I: description of the model and model simulations," *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1676~1692(1985).
17. Oey, L. Y., Mellor, G. L., and Hires, R. L., "A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary, Part II: comparison with observation," *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1693~1709(1985).