

## 경기만 및 한강하구 연안 물리적 모형의 불확실성 분석 Uncertainty Analysis of a Coastal Physical Model in Gyeonggi Bay and Han River Estuary

김정대\* · 정신태\* · 조홍연\*\* · 정경태\*\* · 고동휘\*

Jeong Dae Kim\*, Shin Taek Jeong\*, Hong Yeon Cho\*\*, Kyung Tae Jung\*\* and Dong Hui Ko\*

**요 지 :** 본 연구에서는 경기만과 한강하구 연안에 대하여 물리학적 특성을 파악하고, 대표적인 인자인 조위에 대한 불확실성을 분석하기 위해 MIKE 21의 HD (HyDrodynamics only)를 이용하였다. 기존 실험을 포함하여 하천유량 4가지, 격자 간격 2가지, 경계조건 4가지 그리고 수심 4가지 등 총 15개의 경우에 대해 실험을 수행하였다. 평균조차의 편차에 대한 RMSD(제곱평균제곱근편차, root mean square deviation)를 추정하였다. RMSD는 영국의 자연환경조사회(NERC, 1975)가 도입한 이래로 수문자료 적합도 분석을 위해 자주 사용되어 왔으며 가장 작은 값이 모형에 적합한 것이다. 평균조차 RMSD가 염하수로에서 0.1148로 가장 크며 연평도에서 0.0400으로 가장 작게 산출되었다. 결과적으로 조석(평균조차)은 외해보다 개발이 집중되는 연안과 하구역에서 불확실성이 큰 것으로 판단 할 수 있다. 또한 원수심을 10% 하향조정된 경우 평균조차 RMSD가 0.1540으로 가장 크게 산출되었으며, RMSD의 비교결과는 격자간격(0.0759~0.0851), 경계조건(0.0376~0.0788) 및 하천유량배분(0.0318~0.0471)보다는 수심(0.0478~0.1540)의 영향이 가장 큰 것으로 해석 가능하다.

**핵심용어 :** 경기만, 한강하구, MIKE21, 조위, RMSD

**Abstract :** A model has been constructed in this study for the investigation of physical characteristics of the Gyeonggi Bay and Han River estuary. MIKE 21 HD (HyDrodynamics) has been used for the uncertainty analysis of the tide of the Gyeonggi Bay and Han River estuary. A total of 15 model experiments have been performed for the hydrodynamic parts and the analysis of results have been made in terms of RMSD (Root-mean square deviation) which has been frequently employed in the suitability analysis of hydrological data since the introduction by NERC(1975), U.K. A smaller value of RMSD indicates the more suitability of a parameter to the model. Analysis of the hydrodynamic results has shown that RMSD of the mean tidal range has the largest value of 0.1148 at Yeomha channel while has the smallest value of 0.0400 at Yeonphyong-do, indicating that the uncertainty in the mean tidal range on near-shore side is larger than that of offshore side. Experiment with reduced water depth by 10% has produced a most significant increase in RMSD. It is therefore implied that the model response changes more sensitively to water depth rather than grid sizes, open boundary forcing and river discharge.

**Keywords :** Gyeonggi bay, Han river estuary, MIKE21, tide, RMSD

### 1. 서 론

많은 해양공학자들은 환경적 또는 공학적인 문제를 해결하기 위해 컴퓨터를 이용하여 수치모형을 모의한다. 그

리기 위해서는 모형을 수식화하고 프로그래밍을 해야 한다. 이 작업은 수학적 배경이 필요하며, ‘하천, 해안 그리고 해양의 현상’, ‘물리적인 메커니즘’ 및 ‘컴퓨터 작동’ 등을 이해하여야만 한다. 하지만 모형의 발달과 사용자 환

\*원광대학교 토목환경도시공학부(Corresponding author: Shin Taek Jeong, Division Civil, Environmental and Urban Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea, stjeong@wonkwang.ac.kr)

\*\*한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원(Coastal Development Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

경의 발달로 진술한 고급적인 배경을 지녀야 할 필요가 없어졌다. 소위 'front end'가 가능해져 메뉴를 보고 선택하여 복잡한 시스템에 관여할 필요 없이 유용하게 프로그램을 응용할 수 있게 되었다. 그러나 수치모형의 불확실성에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 수치모형의 해를 구하려는 노력과 함께 여러 종류의 불확실성들에 대한 정량적인 정의와 제거 가능한 불확실성에 대한 처리는 수치모형 모의과정에서 간과해서는 안 되는 중요한 과제이다.

하천수의 수질 모형인 QUAL2E와 QUAL2E-UNCAS (Brown and Barnwell, 1987)는 수질관리 영역의 중요성을 강조하며 불확실성 분석을 이용하고 있으며, CERP (Comprehensive Everglades Restoration Plan)에서는 불확실성 연구회를 통하여 의사결정에 대한 모형 불확실성의 정량화에 대해 연구하였다(Lall, Phillips, Reckhow and Loucks, 2002). UNESCO에서는 수자원 시스템의 계획과 관리에 대한 연구에서 증가하는 경제, 생태, 환경 그리고 사회 이익에 부합하기 위하여 대안들의 선택에 있어서 불확실성 분석을 활용하고 있으며(Loucks and Beek, 2005), 수송-변형 모형에서도 불확실성 분석(Isukapalli, 1999)이 사용되고 있다. 항공공학에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모의에 불확실성 분석을 적용하였다.(Faragher, 2004; Loeven, 2005). 또한 국내에서는 수자원 장기종합계획을 위한 물수지 분석에서 불확실성 분석을 활용 하였으며(이 등, 2005), 확률론적 불확실성 해석기법을 적용하여 국내 수자원 운영에 대한 활용 가능성을 분석하였다(정 등, 2004). 또한 분포형 비점오염원 모형에서의 영향 해석을 중심으로 격자자료의 리샘플링에 따른 불확실성 정량화 및 해석에 관한 연구(성, 2003)가 이루어졌다.

경기만과 한강하구는 담수와 해수가 혼합되는 해역으로 해안공학자와 수공학자들이 집중하여 연구하기 보다는 서로 외면하고 있는 영역이다. 입력자료(INPUT)의 불확실성 측면에서 보면, 이러한 지역은 하굿둑, 방조제 그리고 산업단지 등과 같은 개발로 훼손이 집중된다. 또한 경기만 및 한강하구는 북한과의 지리적 위치 때문에 남북협력의 필요하여 연구조사의 불확실성(경계조건, 초기조건 등)이 증가한다. 시스템(SYSTEM)의 불확실성 측면을 보면 수치모형의 구조, 시간과 공간 차원의 결합, 모형의 복잡성 등에 불확실성이 존재한다. 출력자료(OUTPUT)는 입력자료(INPUT)와 시스템(SYSTEM)에서 오는 불확실성이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 불확실성은 분석을 통하여 감소시킬 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 축소 불가능한 불확실성은 어쩔 수 없으나 축소 가능한 불확실성은 분석을

통하여 처리해야 할 것이다. 본 연구는 MIKE 21을 이용하여 수치모형을 구축하고 결과를 산출한다. 산출된 결과는 검증을 하고, 불확실성을 파악한 후 적절한 지표를 이용하여 정량화 한다.

## 2. 수치모형

본 연구의 대상해역은 천해역으로서 조류의 연직변화는 거의 무시할 수 있으며, 해저면 부근의 경계층을 제외하고는 밀도의 수평, 수직변화 효과는 미미하다. 반면, 항류와 천해배조 형성에 관여하는 비선형 이류항은 고려하였다. 본 연구에서 사용하는 모형은 하구, 만, 그리고 해역에서의 수위 및 흐름을 모의하는 수치모형으로 비정상 상태의 수심 평균된 2차원 흐름을 재현하는 프로그램(MIKE 21)이다. 수심 평균된 질량 및 운동량 보존방정식은 식 (1)-(3)과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yx}) \right] - \Omega q \\ - fVV_x - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p \\ - fVV_y - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$x, y$	: 평균해수면에 위치한 직교 좌표계
$t$	: 시간(s)
$h(x, y, t)$	: 수심(m)
$\zeta(x, y, t)$	: 수면 변위(m)
$p, q(x, y, t) = (uh, vh)$	: x 및 y 방향의 플릭스 밀도( $m^3/s/m$ )
$u(x, y, t) = v(x, y, t)$	: x 및 y 방향의 수심평균 유속(m/s)
$C(x, y)$	: Chezy 계수( $m^{1/2}/s$ )
$g$	: 중력 가속도( $9.8 m/s^2$ )
$f(V)$	: 바람저항 계수
$V, V_x, V_y(x, y, t)$	: 풍속 및 바람의 x, y 방향 성분(m/s)

$\Omega(x, y)$	: 지구 편향력계수( $s^{-1}$ )
$p_a(x, y, t)$	: 대기압( $kg/m/s^2$ )
$\rho_w$	: 물의 밀도( $kg/m^3$ )
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	: 유효 전단 응력 성분

수치 모형의 수립과정은 모형범위의 결정, 이에 따른 격자망의 구성, 수심 등의 기초자료 및 현장 관측자료 또는 기존자료의 분석결과를 토대로 한 개방경계 조건의 입력 등으로 구성된다. 일반적으로 모형범위의 결정은 모형실험을 통한 재현 및 예측결과와 직결되며, 계산조건의 변화가 모형의 개방경계에 이르지 않도록 모형의 범위를 충분히 크게 설정하여야 한다. 경기만과 한강하구 연안 수치 모형의 세부사항은 다음과 같으며 해저지형도는 Fig. 1과 같다.

(1) 격자망

- 격자간격 :  $\Delta x = 100\text{ m}$ ,  $\Delta y = 100\text{ m}$ ,  $\Delta t = 60\text{ s}$
- 격자점수 : 2,098,911개 (=1,311×1,601)
- 면적 : 20,960  $km^2$  (=131  $km$ ×160  $km$ )

(2) 수심자료

- 발행처 : 국립해양조사원(2003년)
- 종류 : 수치해도(Digital Charts)
- 도면번호 : DC323
- 수심기준 : 인천평균해면(4.64 m)

Fig. 1의 전 지역이 수치모형의 영역이며, 100 m 간격

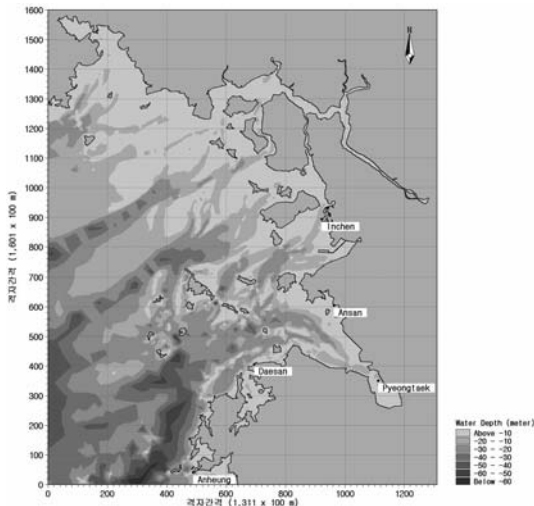


Fig. 1. Gyeonggi Bay and Han River estuary with information on bathymetry and tidal stations operated by NORI (National Oceanographic Research Institute).

으로 격자망을 구성하였다. 주어진 대상해역에서 상기 방정식의 해를 구하기 위해서는 모형의 경계조건이 필요하다. 육지경계조건은 육지경계면과 수직한 유속성분이 없는 무흐름률(no-flux) 조건이며, 개방경계조건(open boundary condition)은 개방경계면 상의 관측치 또는 기존 자료를 선택한 보간한 조위가 수치로 주어지는 수치지정 경계조건이다. 수치 모형의 개방경계조건은 주요 4분조의 반조차와 각각으로 식 (4)를 이용하여 16일의 조위를 계산하였다. 원자료는(124.0°E, 34.0°N)에서 (127.0°E, 38.5°N)까지의 영역에서 1분 간격의 자료이다(이종찬, 2006).

$$\eta_B(x, y, t) = \sum A_j \cos(\omega_j t - g_j) \tag{4}$$

여기서  $\eta_B$ 는 경계면에서의 조위,  $A_j$ 는 조석과의 경계면에서의 반조차,  $\omega_j$ 는 위상속도(phase velocity),  $g_j$ 는 지각(phase lag)이다.

MIKE 21 HD모형의 저면저항(Bed resistance)은 Chezy 공식에 의해  $\frac{g \cdot u \cdot |u|}{C^2 h^2}$ 의 형태로 표현되며, 마닝수(Manning number,  $M$ )는 마닝조도계수(Manning's roughness coefficient,  $n$ )의 역수이다.  $M$ 과 Chezy 계수  $C$ 와는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$C = M \cdot h^{1/6} \tag{5}$$

여기서,  $h$ (=동수반경)는 수심이며, Chezy 계수와 마닝수의 단위는 각각  $m^{1/2}/s$ ,  $m^{1/3}/s$ 이다. 마닝수는 20-40  $m^{1/3}/s$ , 통상적으로는 32  $m^{1/3}/s$ 를 사용하며, Chezy 계수는 일반적으로 30-50  $m^{1/2}/s$ 를 사용한다. 일반적으로 저면저항을 증가시키기 위해서는 작은 Chezy 계수를 사용한다. 본 모형은 마닝수를 이용하였으며, 그 값은 20  $m^{1/3}/s$ 이다.

### 3. 수치모형의 결과 및 검증

#### 3.1 물리적 모형의 결과(조위)

하구와 연안의 물리적 항목으로 대표적인 것은 조위와 조류이다. 조위는 주요지점 5곳의 결과를 시계열자료로 Fig. 2에 도시하였다. 인천, 안산, 팽택, 안항 및 대산의 조위자료는 각각 국립해양조사원에서 조위관측소를 운영하고 있는 지점으로 모형의 결과와 관측의 결과를 비교분석하기에 적합하다. Fig. 2의 실선은 5개 지점에 대한 모형(MIKE 21)의 결과값이며, 점선은 국립해양조사원(NORI, National Oceanographic Research Institute)의 관측값에

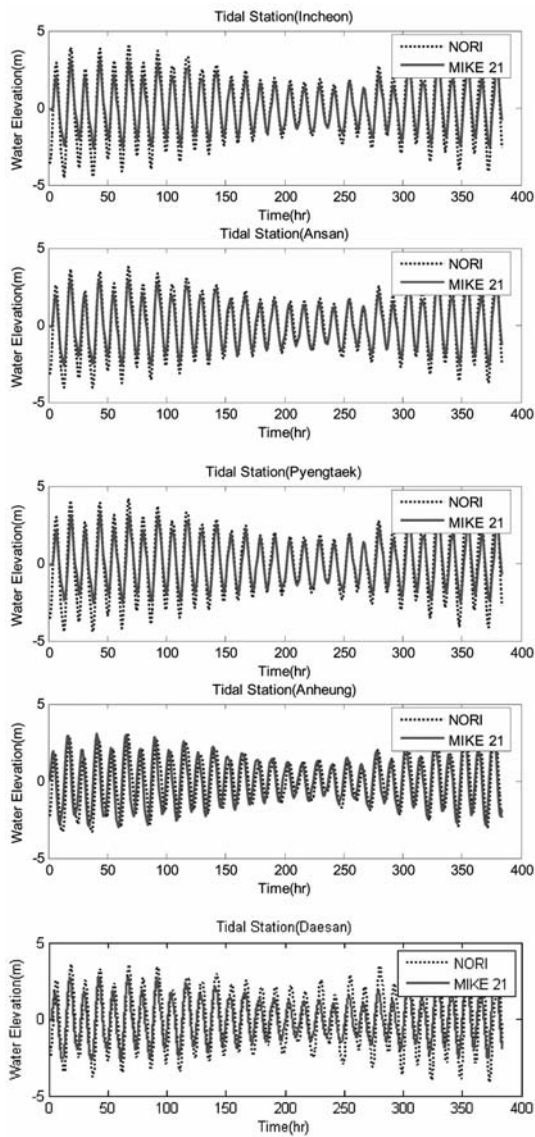


Fig. 2. Comparison of observed and computed tidal water levels at Incheon, Ansan, Pyengtaek, Anheung and Daesan over 16 days.

해당한다.

국립해양조사원(NORI)의 자료는 웹 사이트(<http://www.nori.go.kr>)를 통하여 자료가 공개되고 있으며 각 지점의 위치는 Fig. 1에 표시하였다. Fig. 2의 그림에서 조위자료를 비교해 본 결과 모형(MIKE 21)의 조위값이 NORI의 값보다 대조시에 작은 경향을 나타냈다. 이 부분에 대해서는 3.2절에서 검증을 통해 원인을 분석하였다.

조류의 경우, 기존의 연구결과에 나타나는 것과 같이 대

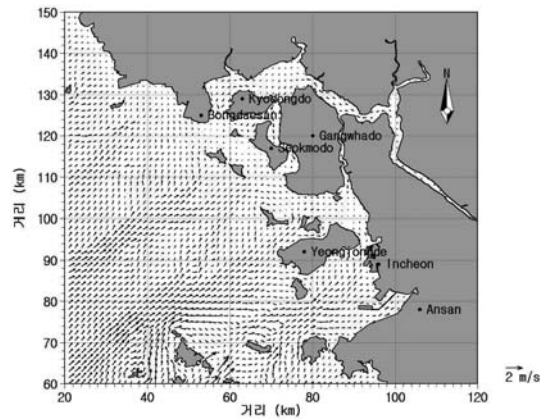


Fig. 3. Flow vectors at the middle of flood phase.

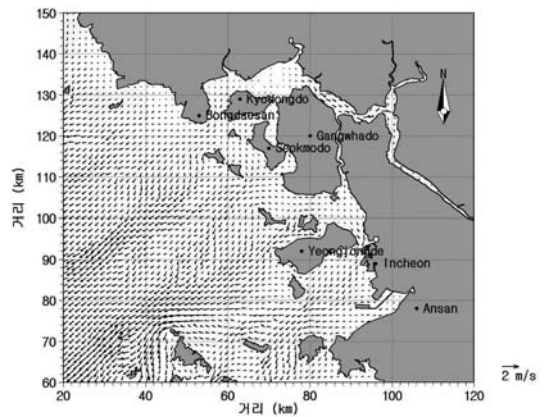


Fig. 4. Flow vectors at the middle of ebb phase.

상해역에서 모형으로 재현되는 해수유동은 창조류는 남서에서 북동방향으로(Fig. 3), 낙조류는 북동에서 남서방향으로(Fig. 4) 나타나며, 한강하구지역은 조석의 영향보다는 지형과 한강유량 등의 영향의 흐름을 보이고 있다.

### 3.2 물리적 모형의 검증(조위)

MIKE 21의 조위의 결과가 NORI(국립해양조사원)의 관측값보다 과소평가되는 경향이 있다(3.1절 참고). 이러한 원인을 분석하기 위해 KORDI(한국해양연구원)에서 홈페이지(<http://www.kordi.re.kr/>, Fig. 5)를 통해 제공하는 조석 조화상수 값들을 검토하였다. 대표적으로 안흥의 조화상수는 Table 1에 정리하였다. KORDI는 한국해양연구원의 값이고 LEE(이종찬, 2006)는 본 모형에 적용한 값이다. 안흥 지점에서는 주요 4분조의 진폭의 합(평균해면, M.S.L.)이 KORDI보다 19.18 cm 작은 것을 확인할 수 있다. KORDI와 LEE의 차이는 평균 -31.85 cm에서 대연평도

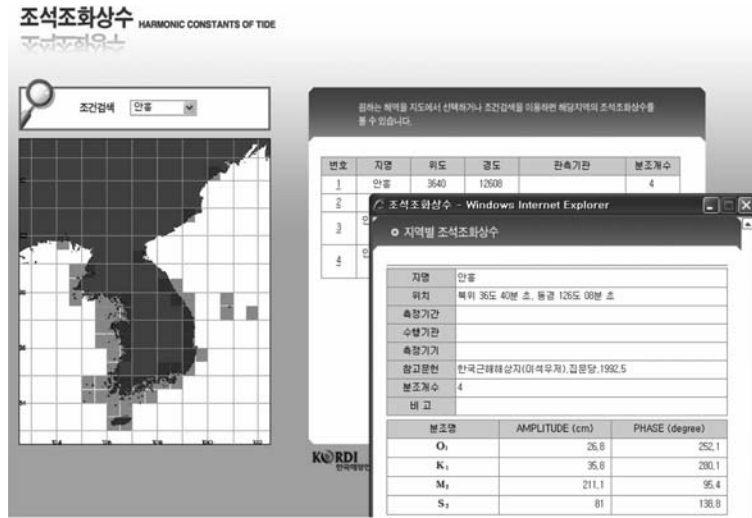


Fig. 5. Harmonic Constants of Tide(<http://www.kordi.re.kr>).

Table 1. Comparison of Harmonic Constants of Tide(Anheung)

지명	안흥(Anheung)	
위치	북위 36도 40분 12초, 동경 126도 08분 06초	
측정기간	1987년 01월부터 1988년 01월까지	
수행기관	수로국 해양과	
참고문헌	한국근해 해상지(이석우 저), 1992, 9	
분조개수	60	
비고	분석자료 : 6/1 - 6/15	
분조명	AMPLITUDE(cm) PHASE(degree)	
O <sub>1</sub>	NORI	26.80 252.1
	LEE	26.99 251.01
K <sub>1</sub>	NORI	35.80 280.1
	LEE	34.72 286.23
M <sub>2</sub>	NORI	211.10 95.4
	LEE	195.66 105.868
S <sub>2</sub>	NORI	81.00 138.8
	LEE	78.15 154.994
합계	NORI	354.70
	LEE	335.52
오차 (KORDII-LEE)	19.18	

63.26 cm까지 분포하며 평균은 14.79 cm이다. 전체적인 비교는 Table 2에 정리하였으며, 이러한 차이는 해양물리 자료의 시공간적 자료의 부족과 불규칙한 공간분포 특성으로 설명할 수 있다. 본 연구에서는 LEE(이종찬, 2006)의 조화상수 값으로 물리적 모형의 개방경계조건을 산출하였기 때문에 입력자료(조위)가 과소평가되어 결과로 전

파된 것으로 판단된다. 하지만 본 연구는 기존의 연구와 달리 특정지역의 현상규명보다는 모형의 구축을 통한 불확실성 분석에 중점을 두고 있기 때문에 보정을 실시하지 않았다.

#### 4. 물리적모형(조위)의 불확실성 분석

하천과 해안지역에서 나타나는 여러 현상 중에서 대표적인 물리적인 현상은 조석이다. 조석에 대한 관측은 지금까지 충분히 수행되어왔고 자료로 축적되어 있기 때문에 모형에 대한 검증이 가능하다. 모형의 수립과 검증으로 안정된 모형을 구축할 수 있으며, 모형의 수립은 2장에서 검증은 3장에서 수행하였다. 이렇게 구축된 모형을 표준(경우 1)으로 정하였다.

표준(경우 1)으로 정한 모형은 여러 조건에 의하여 불확실성을 가지게 된다. 예를 들면, 초기조건(수심), 경계조건, 격자간격 및 하천유량배분 등이 있다. 대표적인 경우는 Table 3에 정리하였으며 주요 지점에 대한 하천유량배분(4가지), 격자간격(2가지), 경계조건(4가지) 및 수심(4가지)의 불확실성 분석을 하였다.

본 연구의 관심지역은 하구에서 만으로 이어지는 지역이고, 또한 서해안은 섬들이 많고 해안선도 복잡하다. 각각의 경우에 대하여 외해, 내해 그리고 수로를 Table 4와 Fig. 6에 정리하고 도시 하였다. 각 위치에 따른 조위를 비교하고, 불확실성을 정량적으로 비교하여 5장에 기술하였다.

연평도는 경기만의 외해 쪽, 장봉도는 내해 쪽에 위치

**Table 2.** Error of M.S.L.(Harmonic Constants of Tide)

(unit: cm)

구역	지점명	KORDI	LEE	오차(KORDI-LEE)	
				절대오차	상대오차(%)
①	대연평도	420.07	356.82	63.25	15.06
②	장봉도	445.39	412.60	32.79	7.36
③	세어도	505.00	478.63	26.37	5.22
④-1	연평도	366.50	323.94	42.56	11.61
④-2	율도	400.18	351.10	49.08	12.56
④-3	굴업도	340.34	359.11	-18.77	-5.52
④-4	백아리	356.40	346.36	10.04	2.82
⑤	풍도	423.20	428.80	-5.60	-1.32
⑥	대부도	467.80	464.17	3.63	0.78
⑦	가대암	313.04	326.23	-13.19	-4.21
⑧	안흥	354.70	335.53	19.17	5.40
⑨	평택	465.80	497.65	-31.85	-6.84
평균		404.87	390.08	14.79	3.55

**Table 3.** Parametric combinations for the model uncertainty analysis

경우	수심(m)	경계조건(m)	격자간격(m)	유량배분			조건
				한강	임진강	예성강	
1				○	○	○	표준
2				○	×	×	유량배분(1)
3			100	×	○	×	유량배분(2)
4		$M_2$		×	×	○	유량배분(3)
5				×	×	×	유량배분(4)
6	원수심		300	○	○	○	격자간격(1)
7			900	○	○	○	격자간격(2)
8		$M_2$ 의 진폭+10%		○	○	○	경계조건(1)
9		$M_2$ 의 진폭-10%		○	○	○	경계조건(2)
10		$M_2$ 의 진폭+5%		○	○	○	경계조건(3)
11		$M_2$ 의 진폭-5%	100	○	○	○	경계조건(4)
12	원수심+10%			○	○	○	수심(1)
13	원수심-10%			○	○	○	수심(2)
14	원수심+5%	$M_2$		○	○	○	수심(3)
15	원수심-5%			○	○	○	수심(4)
0	원수심	$M_2 + S_2$	100	○	○	○	유량검증용

**Table 4.** Geographical information on selected points for the model uncertainty

번호	위치	표시	위도	경도	기타
1	연평도	Yeonphyeongdo	37°19'22"	125°42'47"	외해
2	장봉도	Jangbongdo	37°31'18"	126°19'37"	섬
3	인천	Incheon	37°28'19"	126°35'44"	내해
4	시화(TCO1)	Shiwha(TCO1)	37°18'46"	126°36'10"	내해
5	염하수로	Yeomha			격자에서 선택 수로1
6	석모도-강화도	S-Kang			격자에서 선택 수로2
7	교동도-석모도	K-S			격자에서 선택 수로3
8	봉대산-교동도	B-K			격자에서 선택 수로4

한 섬, 인천과 시화는 연안지역에 해당한다(Fig. 6). Table 6~7의 첫 번째 칸의 경우는 발생 가능한 불확실 요소에 해

당하며 Table 3에 전술하였다. 경우 1의 모형은 2장에서 수립하고 3장에서 검증한 표준에 해당하며 수치해도(발행

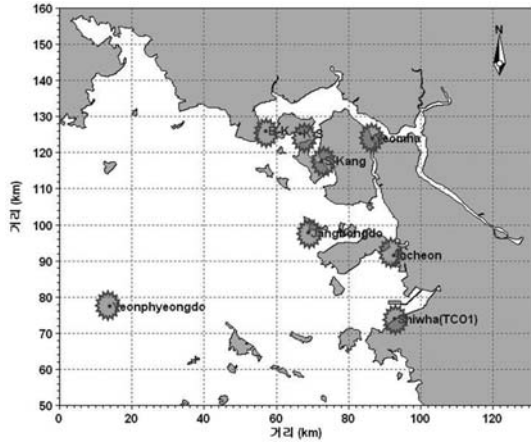


Fig. 6. Geographical locations of selected points for the model uncertainty analysis.

Table 5. Monthly mean discharges of Han River, Imjin River and Yeseong River in July 2006 deduced from WAMIS(<http://www.wamis.go.kr>).

	유역면적(km <sup>2</sup> )	분배율	유량(m <sup>3</sup> /s)
한강	26,018	1.000	6,048
임진강	8,897	0.342	2,068
예성강	3,916	0.151	913

처: 국립해양조사원, 2003년)의 수심, 경계조건(이중찬, 2006), 격자간격(100 m) 그리고 7월의 하천(한강, 임진강 및 예성강)유량을 반영한 것이다. 하천유량은 한강의 유량을 기준으로 유역면적에 비례하여 입력하였다(Table 5 참조).

Fig. 7은 한강 유량을 팔당댐의 방류량을 환산하여 한강의 환산유량을 구하고 월평균 환산유량과 일평균 환산유

량을 도시한 것이다(국가 수자원관리 종합정보시스템, <http://www.wamis.go.kr> 참조). 7월의 월평균환산유량은 6,048 m<sup>3</sup>/s에 달한다.

Table 5에서 주요하천 환산유량의 분배율은 한강의 유역면적에 대한 각 하천의 유역면적의 비율이며, 임진강은 0.342(=8,897/26,018)이고 예성강은 0.151(=3,916/26,018)이다. 한강 환산유량을 분배율로 배분하면 임진강 환산유량은 2,068(=6,048×0.342)이며 예성강 환산유량은 913(=6,048×0.151)이다.

## 5. 결 과

### 5.1 경기만 지역

Table 6은 경기만과 한강하구의 모형에서 경기만의 외해와 내해의 지점을 분석하여 정리한 것이다. 표에서 역상으로 표시된 부분은 평균조차의 절대오차가 0.20 m 이상인 곳에 해당한다. 하천유량의 영향을 적게 받는 외해와 연안의 경우 하천유량에 의한 평균조차의 절대오차는 연평도(외해), 장봉도(섬), 인천(내해) 및 시화(내해)의 0.00 m이다. 다시 말해 절대오차는 거의 발생하지 않았다.

연평도(외해)에서는 개방경계조건인 M<sub>2</sub>조의 진폭을 10% 변화(경우 8, 9) 시켰을 때 평균조차가 0.30 m의 불확실량을 가지며 이 값은 상대오차로 표현하면 9.35%에 해당된다. 반면 유량배분, 격자간격 및 수심의 변화에는 0.00~1.56% 이하의 상대오차를 보였다. 결과적으로 외해는 개방경계조건이 가장 중요한 불확실 요소로 판단된다.

절대오차는  $y_i - w_i$ 이며, 상대오차는  $(y_i - w_i)/y_i \times 100$ 이다.

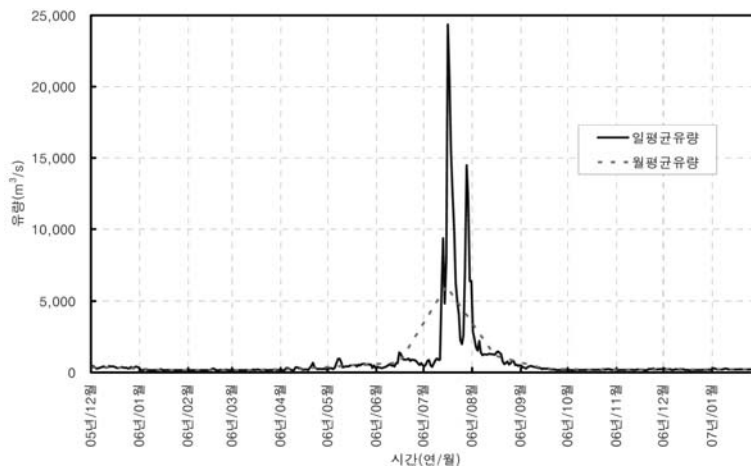


Fig. 7. Daily and monthly mean discharges of Han River during the period of Feb 2005 to Feb 2007 converted from WAMIS(<http://www.wamis.go.kr>).

Table 6. Results from the model uncertainty analysis(Kyeonggi Bay)

경우	조건	연평도(외해)			장봉도(섬)			인천(내해)			시화(내해)		
		평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)	평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)	평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)	평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)
1	표준	3.21	-	-	3.70	-	-	3.96	-	-	3.99	-	-
2	유량배분(1)	3.21	0.00	0.00	3.70	0.00	0.00	3.96	0.00	0.00	3.99	0.00	0.00
3	유량배분(2)	3.21	0.00	0.00	3.70	0.00	0.00	3.96	0.00	0.00	3.99	0.00	0.00
4	유량배분(3)	3.21	0.00	0.00	3.70	0.00	0.00	3.96	0.00	0.00	3.99	0.00	0.00
5	유량배분(4)	3.21	0.00	0.00	3.70	0.00	0.00	3.96	0.00	0.00	3.99	0.00	0.00
6	격자간격(1)	3.18	0.03	0.93	3.55	0.14	3.78	3.70	0.26	6.57	3.76	0.23	5.76
7	격자간격(2)	3.20	0.01	0.31	3.65	0.04	1.08	3.85	0.11	2.78	3.99	0.00	0.00
8	경계조건(1)	3.51	-0.30	-9.35	3.94	-0.25	-6.76	4.17	-0.21	-5.30	4.26	-0.27	-6.77
9	경계조건(2)	2.91	0.30	9.35	3.43	0.27	7.30	3.72	0.24	6.06	3.70	0.29	7.27
10	경계조건(3)	3.36	-0.15	-4.67	3.82	-0.12	-3.24	4.07	-0.11	-2.78	4.13	-0.13	-3.26
11	경계조건(4)	3.06	0.15	4.67	3.57	0.13	3.51	3.84	0.12	3.03	3.85	0.14	3.51
12	수십(1)	3.25	-0.04	-1.25	3.89	-0.19	-5.14	4.30	-0.34	-8.59	4.12	-0.13	-3.26
13	수십(2)	3.16	0.05	1.56	3.30	0.40	10.81	3.60	0.36	9.09	3.62	0.37	9.27
14	수십(3)	3.23	-0.02	-0.62	3.82	-0.12	-3.24	4.16	-0.21	-5.30	4.09	-0.09	-2.26
15	수십(4)	3.19	0.02	0.62	3.52	0.18	4.86	3.77	0.19	4.80	3.84	0.16	4.01

여기서,  $y_i$ 는 표준(경우 1)의 평균조차(m)이고  $w_i$ 는 각 경우(경우 2-15)의 평균조차(m)이다.

경기만의 내해에 위치한 섬인 장봉도는 경계조건인  $M_2$  조의 진폭의 10%의 변화(경우 9)에 의해 평균조차 절대오차는 0.27 m(상대오차 7.30%)까지 나타났으며, 수십의 10% 변화(경우 13)에 의해 평균조차의 절대오차가 0.40 m(상대오차 10.81%)까지 발생하였다. 결과적으로 장봉도(섬)는 수십이 가장 큰 불확실성 요소이며 그 다음은 경계조건이다. 또한 격자간격이 커져 섬의 육지경계가 정확하게 표현하지 못한다면 불확실량[예: 격자간격 300 m(경우 6)일 때 절대오차 0.14 m(상대오차 3.78%) 발생]이 발생할 가능성이 있다.

인천의 경우 격자간격이 300 m(경우 6)일 때 절대오차 0.26 m(상대오차 6.57%), 경계조건 10% 변화(경우 9)에 의해 절대오차 0.24 m(상대오차 6.06%) 그리고 수십의 10% 감소(경우 13)에 의해 평균조차의 절대오차 0.36 m(상대오차 9.09%)가 발생하였다. 시화의 경우 격자간격이 300 m(경우 6)일 때 절대오차 0.23 m(상대오차 5.70%), 경계조건 10% 변화(경우 9)에 의해 절대오차 0.29 m(상대오차 7.27%) 그리고 수십의 10% 감소(경우 13)에 의해 절대오차 0.37 m(상대오차 9.27%)의 평균조차 불확실량이 발생하였다. 하천유량의 영향권이 아닌 내해에 위치한 인천과 시화의 경우에는 수십이 가장 큰 불확실요소라고 판단된다. 경계조건과 격자간격에 의해서도 상당한 불확실성이 나타난다. 따라서 내해(연안)의 경우 외해보다 불확실 요소

가 많다는 것이 증명되었으며, 개발이 집중되는 연안역을 수치모형화 할 경우에 수십, 경계조건 및 격자간격의 구성에 세심한 주의가 요구된다.

## 5.2 한강 하구역

한강, 임진강 및 예성강의 하구 지역은 감소하천에 해당한다. 경기만과 한강하구지역의 모형에서 하천유량이 연안으로 유출되고 한강쪽으로 유입되는 경로는 크게 4개의 경로로 나눌 수 있다. 이것은 Table 4의 5에서 8까지 경로이며, 결과는 Table 7에 정리하였다.

염하수로의 경우 수십이 10% 감소(경우 13)할 때 평균조차의 절대오차 0.44 m(상대오차 27.85%)가 발생하였다. 석모도-강화도의 경우 수십이 10% 감소(경우 13)할 때 평균조차의 절대오차 0.42 m(상대오차 15.50%)가 발생하였다. 교동도-석모도의 경우 수십이 10% 감소(경우 13)할 때 평균조차의 절대오차 0.42 m(상대오차 15.27%)가 발생하였다. 봉대산-교동도의 경우 수십이 10% 증가(경우 12)할 때 평균조차의 절대오차가 0.38 m(상대오차 12.97%)가 발생하였다.

염하수로, 강화도-석모도, 석모도-교동도 및 교동도-봉대산은 수로의 형상이며, 각각 격자간격에 의해 불확실량이 발생하였다. 염하수로의 경우 격자간격이 900 m(경우 7)일 때 평균조차의 절대오차 0.26 m(상대오차 16.46%)가 발생하였다. 강화도-석모도의 경우 격자간격이 900 m(경우 7)일 때 평균조차의 절대오차 0.34 m(상대오차 12.55%)가



**Table 7.** Results from the model uncertainty analysis(Han River Estuary)

경우	조건	염하수로			강화도-석모도			석모도-교동도			교동도-봉대산		
		평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)	평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)	평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)	평균 조차 (m)	절대 오차 (m)	상대 오차 (%)
1	표준	1.58	-	-	2.71	-	-	2.75	-	-	2.93	-	-
2	유량배분(1)	1.63	-0.05	-3.16	2.72	0.00	0.00	2.74	0.00	0.00	2.94	-0.01	-0.34
3	유량배분(2)	1.73	-0.15	-9.49	2.72	-0.01	-0.37	2.72	0.02	0.73	2.96	-0.03	-1.02
4	유량배분(3)	1.75	-0.17	-10.76	2.72	-0.01	-0.37	2.72	0.03	1.09	2.96	-0.03	-1.02
5	유량배분(4)	1.73	-0.15	-9.49	2.72	-0.01	-0.37	2.72	0.03	1.09	2.97	-0.04	-1.37
6	격자간격(1)	1.58	0.00	0.00	2.37	0.34	12.55	2.52	0.22	8.00	2.83	0.09	3.07
7	격자간격(2)	1.32	0.26	16.46	2.38	0.34	12.55	2.58	0.17	6.18	2.87	0.05	1.71
8	경계조건(1)	1.65	-0.07	-4.43	2.82	-0.11	-4.06	2.90	-0.15	-5.45	3.10	-0.17	-5.80
9	경계조건(2)	1.49	0.09	5.70	2.59	0.12	4.43	2.57	0.17	6.18	2.79	0.14	4.78
10	경계조건(3)	1.62	-0.04	-2.53	2.77	-0.06	-2.21	2.82	-0.08	-2.91	3.00	-0.07	-2.39
11	경계조건(4)	1.54	0.04	2.53	2.65	0.06	2.21	2.66	0.09	3.27	2.86	0.07	2.39
12	수심(1)	1.79	-0.21	-13.29	3.07	-0.36	-13.28	3.03	-0.28	-10.18	3.31	-0.38	-12.97
13	수심(2)	1.14	0.44	27.85	2.29	0.42	15.50	2.33	0.42	15.27	2.60	0.33	11.26
14	수심(3)	1.70	-0.12	-7.59	2.92	-0.20	-7.38	2.86	-0.11	-4.00	3.13	-0.21	-7.17
15	수심(4)	1.36	0.21	13.29	2.49	0.22	8.12	2.57	0.17	6.18	2.78	0.14	4.78

발생하였다. 교동도-석모도의 경우에는 격자간격이 300 m (경우 6)일 때 평균조차의 절대오차 0.22 m(상대오차 8.00%)가 발생하였다. 봉대산-교동도의 경우 격자간격 900 m(경우 7)일 때 평균조차의 절대오차 0.05 m(상대오차 1.71%)가 발생하였다.

경계조건인 조의 진폭을 10% 증가, 10% 감소, 5% 증가 및 5% 감소(경우 8~11)시켰을 경우 각 수로의 평균조차의 절대오차는 0.04~0.17 m(상대오차 2.21%~6.18%)가 발생하였다.

하지만 해수의 유동량에 비하여 하천유량은 작은 양에 해당한다. 한강과 임진강의 영향권에서 가까운 염하수로는 유량배분(경우 2~5)에 의해 평균조차의 절대오차가 0.05~0.17 m(상대오차 3.16%~10.76%)가 발생하였다. 강화도-석모도, 석모도-교동도 및 교동도-봉대산의 경우에는 평균조차의 절대오차 0.00~0.04 m(상대오차 0.00%~1.37%)가 발생하였다. 유량이 집중되는 7월의 경우에도 하천유량에 의한 평균조차 불확실량은 상대적으로 작았다.

결과적으로 하구역에서 물리적 모형(조석)의 불확실성은 수심이 가장 지배적인 인자이며, 다음은 격자간격(지형의 정확한 표현)과 경계조건이다. 또한 염하수로처럼 하천유량이 영향을 미치는 지역은 하천유량도 불확실성을 발생시킨다. 즉 하구역의 수치모형 구축에 있어서 지형의 단순화와 수심의 왜곡은 하구역에서 불확실성 증대를 야기하는 것으로 사료된다.

### 5.3 물리적 모형(조위)의 RMSD

경기만과 한강하구의 물리적 모형(조석)은 Table 3에 전술한 15가지의 경우에 대하여 모의하였다. RMSD(제곱평균제곱근편차, root mean square deviation)는 조석(평균조차)의 편차를 추정하는 것이다. 즉 RMSD가 가장 작은 모형이 표준(경우 1)과 잘 적합되는 것이다. RMSD는 영국의 자연환경조사회(NERC, 1975)가 수문자료 적합도분석을 위해 자주 사용하여 왔으며 RMSD는 식 (6)과 같다.

$$RMSD = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - w_i}{y_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

여기서,  $y_i$ 는 표준(경우 1)의 평균조차(m)이고  $w_i$ 는 각 경우(경우 2~15)의 평균조차(m)이다. Table 8의 값들은 식 (4)의  $(y_i - w_i/y_i)^2$ 이며 이 값들을 평균하여 제곱하면 RMSD를 계산할 수 있다.

불확실성 분석의 경우의 수는 총 15가지이다. 표준으로 정한 경우 1과 나머지 14가지의 경우에 대한 평균조차의 RMSD는 Table 8에 정리하였으며 경우 13의 RMSD가 0.1540으로 가장 크게 나타났다. 경우 13은 원수심을 10% 하향조정한 결과이다. 즉 모형을 수립할 때 수심이 작게 입력된다면 결과의 불확실성이 크게 나타날 수 있다고 판단할 수 있다. 그 다음은 경우 7(격자간격 900 m)일 때 RMSD가 0.0851로 크게 나타났다.

물리적 모형의 불확실성 분석지점은 연평도, 장봉도, 인

Table 8. RMSD values of mean tidal range computed for the parametric combinations.

(단위 : m)

경우	조건	연평도 (외해)	장봉도 (섬)	인천 (내해)	시화 (내해)	염하 수로	강화도 - 석모도	석모도 - 교동도	교동도 - 봉대산	RMSD	순위
1	표준	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	유량배분(1)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0000	0.0000	0.0071	0.0318	14
3	유량배분(2)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0090	0.0000	0.0001	0.0061	0.0436	11
4	유량배분(3)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0116	0.0000	0.0001	0.0061	0.0471	10
5	유량배분(4)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0090	0.0000	0.0001	0.0056	0.0429	12
6	격자간격(1)	0.0001	0.0016	0.0043	0.0033	0.0000	0.0157	0.0070	0.0140	0.0759	6
7	격자간격(2)	0.0000	0.0002	0.0008	0.0000	0.0271	0.0148	0.0038	0.0112	0.0851	2
8	경계조건(1)	0.0087	0.0042	0.0028	0.0046	0.0020	0.0016	0.0030	0.0012	0.0593	7
9	경계조건(2)	0.0087	0.0053	0.0037	0.0053	0.0032	0.0020	0.0043	0.0171	0.0788	5
10	경계조건(3)	0.0022	0.0011	0.0008	0.0012	0.0006	0.0005	0.0006	0.0043	0.0376	13
11	경계조건(4)	0.0022	0.0012	0.0009	0.0012	0.0006	0.0005	0.0011	0.0119	0.0496	8
12	수심(1)	0.0002	0.0026	0.0074	0.0011	0.0177	0.0176	0.0104	0.0010	0.0851	3
13	수심(2)	0.0002	0.0117	0.0083	0.0086	0.0776	0.0240	0.0233	0.0361	0.1540	1
14	수심(3)	0.0000	0.0011	0.0026	0.0006	0.0058	0.0060	0.0016	0.0006	0.0478	9
15	수심(4)	0.0000	0.0024	0.0023	0.0014	0.0194	0.0066	0.0043	0.0179	0.0824	4
	RMSD	0.0400	0.0473	0.0491	0.0442	0.1148	0.0799	0.0653	0.1000		
	순위	8	6	5	7	1	3	4	2		

천, 시화(TCO1), 염하수로, 석모도-강화도, 교동도-석모도 및 봉대산-교동도로 총 8개 지점이다. Table. 8에서 염하수로의 RMSD가 0.1148로 가장 크며 평균조차의 불확실성이 가장 큰 지점이라고 해석가능하다.

## 6. 결 론

물리적 모형(조석)에서, 지점에 의해 분류한 평균조차의 RMSD(Table 8 참조)는 염하수로(0.1148), 교동도-봉대산(0.1000), 강화도-석모도(0.0799), 석모도-교동도(0.0653), 인천(0.0491), 장봉도(0.0473), 시화(0.0442) 및 연평도(0.0400) 순으로 작게 추정되었다. 따라서, 평균조차(조석)의 불확실성은 외해보다 개발이 집중되는 연안과 하구역에서 크게 나타났다.

물리적 모형(조석)에서, 경우에 의해 분류한 평균조차의 RMSD(Table 8 참조)는 경우 13(0.1540), 경우 7(0.0851), 경우 12(0.0851) 등의 순으로 작게 추정되었다. 여기서, 경우 13은 원수심을 10% 얇게 했을 경우, 경우 7은 격자간격을 100 m에서 900 m로 변경 그리고 경우 12는 원수심을 10% 깊게 했을 때이다(Table 3참조). 15가지 경우의 결과에서 조석의 불확실성은 격자간격, 경계조건 및 하천유량 배분보다 수심이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 그리고 내해(연안)의 경우 외해보다 불확실 요소가 많

다는 것이 증명되었으며, 개발이 집중되는 연안역을 수치 모형화 할 경우에 수심, 경계조건 및 격자간격의 세심한 주의가 요구되며, 염하수로처럼 하천유량이 영향을 미치는 지역은 하천유량도 불확실성을 증가시킬 수 있다.

정확한 관측, 수치모형의 개발 그리고 모의결과에 대하여 불확실성 분석이 지속적으로 이루어진다면 향후 기상 이변, 환경변화 그리고 생태계 변화에 좀 더 실질적으로 대처할 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로 좀 더 심도 있고 일반화된 불확실성 분석을 위해 더 많은 인자를 대상으로 많은 경우를 분석할 계획이며, 하천유량의 월평균값과 일평균값에 의한 결과 분석과 이로 인한 염분이나 COD 확산모형에 대한 연구를 진행할 계획이다.

## 감사의 글

이 논문은 2006년도 원광대학교의 교비 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 이승욱, 김영오, 이동률 (2005). 물수지 분석을 위한 불확실성 정량화, 한국수자원학회논문집 제38권 제4호, pp. 281-292.  
이종찬 (2006). 2006년 5월 29일 전자메일교신(jclee@kordi.re.kr),

- 한국해양연구원.
- 정참삼, 허준행, 배덕효 (2004). 국내 유역에 대한 GCM 정보의 확률론적 불확실성 분석, 한국수자원학회논문집 제 37권 제2호, pp. 173-184.
- 성동권 (2003). 격자자료의 리샘플링에 따른 불확실성 정량화 및 해석에 관한 연구, 박사학위논문, 전북대학교.
- Brown, L.C. and Barnwell, Jr. T.O. (1987). The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS, Environmental Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Athens, Georgia.
- Faragher, J. (2004). Probabilistic Methods for the Quantification of Uncertainty and Error in Computational Fluid Dynamics Simulations, Tech. Report DSTO-TR-1633, DSTO Platforms Sciences Laboratory.
- Isukapalli, S.S. (1999). Uncertainty Analysis of Transport-Transformation Models, New Brunswick, New Jersey.
- Loucks, D.P. and Beek, E. (2005). Water Resources Systems Planning and Management, UNESCO and WL/Delft Hydraulics.
- Natural Environment Research Council(NREC) (1975). Flood Studies Report, Vol. 1-5. NERC, London, pp. 1100.
- Upmanu Lall, Donald L. Phillips, Kenneth H. Reckhow and Daniel P. Loucks(Chair) (2002). Quantifying and Communicating Model Uncertainty for Decision Making in the Everglades, U. S. Army Corps of Engineers South Florida Water Management District West Palm Beach, FL.

---

Received May 26, 2008

Accepted June 18, 2008