한국해안 · 해양공학회논문집
제 25 권 제 2 호, pp. 41~51, 2013년 4월
http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.2.41

# 경기만 염하수로에서의 비정규 격자 수치모델링을 통한 조간대 조수로의 고려에 따른 Mass Transport 특성

# Characteristics of Mass Transport Depending on the Feature of Tidal Creek at Han River Estuary, Gyeong-gi Bay, South Korea

김민하*·** · 우승범**
Minha Kim*·** and Seung-Buhm Woo**

**요 지 :** 경기만 한강 하구역에 대한 지속적인 연안개발에 따른 해양 환경변화의 예측 및 평가에 수치모델이 사용되어 왔지만 기존의 연구들은 조간대의 불규칙한 지형 재현의 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 비정규 격자 체계의 수치모델을 적용하여 강화남단 조간대에서 조수로 지형에 따른 해상도의 조절이 한강 하구역의 조석과 잔차 수송량 변화특성 산정에 어떠한 영향을 미치는지 파악하였다. 이를 위하여 격자 구성 시 조수로의 해상도를 주변 해상도와 동일하게 재현한 실험 A와 조수로의 해상도를 주변의 해상도에 비해 높게 재현한 실험 B를 수행하였다. 각 실험 별 관측치와 모델치의 $M_2$ 분조의 진폭에 대해 평균제곱근오차와 절대상대오차를 계산해본 결과, 두 평균제곱근오차의 차이와 절대상대오차의 차이가 한강 상류와 석모수로 해역에서 약 40% 이상으로 나타났다. 이를 통해 격자 구성 시 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절하는 것이 한강 하구역에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한 잔차 수송량의 변화특성을 파악하기 위하여 염하수로 입구(초지대교 인근: Line 1)와 염하수로 남단(영종대교 남단: Line 2)에서 관측한 단면유속자료로부터 계산된 잔차 수송량을 모델 별로 비교하였다. 각 실험 별로 산정된 Lagrangian 순 질량 수송량은 각 항마다 정도의 차이는 보이지만 전반적으로 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절하지 않은 실험 A가 해상도를 조절한 실험 B보다 약 2배 이상 과다산정 된 경향을 볼 수 있었다. 이 연구를 통하여 조간대의 조수로 지형이 조간대 모의 뿐만 아니라 수치모델의 전반적인 해수 유동장에도 큰 영향을 미치고 넓은 조간대 및 수심경사가 큰 조수로 지형을 가진 지역에서의 잔차 수송량 특성을 이해하기 위해서는 수치모의 시 조간대의 조수로 지형을 충분히 반영할 수 있도록 격자를 구성해야 한다는 것을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 조간대, mass flux, tidal creek, 비정규 격자, FVCOM

**Abstract :** The tidal creek dependent mass transport characteristic in Gyeong-Gi Bay (west coast of Korea) was studied using field measured data and numerical model. Gyeong-Gi Bay consists of 3 main tidal channels and contains a well-developed vast tidal flat. This region is famous for its large tidal difference and strong current. We aim to study the effect of tidal creek in the tidal flat on the mass exchange between the estuary and the ocean. For numerical application, the application of unstructured grid feature is essential, since the tidal creek has complicated shape and form. For this purpose, the FVCOM is applied to the study area and simulation is performed for 2 different cases. In case A, geographic characteristics of the tidal creek is ignored in the numerical grid and in case B, the tidal creek are constructed using unstructured grid. And these 2 cases are compared with the field measured cross-channel mass transport data. The cross-channel mass transport at the Yeomha waterway mouth and Incheon harbor was measured in June, 9~10 (Spring tide) and 17~18 (Neap tide), 2009. CTD casting and ADCP cross-channel transect was conducted 13 times in one tidal cycle. The observation data analysis results showed that mass transport has characteristic of the ebb dominance Line 1 (Yeomha waterway mouth), on the other hand, a flood dominant characteristic is shown in Line 2 (Incheon harbor front). By comparing the numerical model (case A & B) with observation data, we found that the case B results show much better agreement with measurement data than case A. It is showed that the geographic feature of tidal creek should be considered in grid design of numerical model in order to understand the mass transport characteristics over large tidal flat area.

**Kewords :** tidal flat, tidal creek, mass transport, unstructured grid, FVCOM

*㈜전략해양(Ocean Research and Strategy Corp., Seoul 153-706, Korea. mhkim@oceanrns.com)
**인하대학교 해양과학과(Corresponding author: Seung-Buhm Woo, Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Tel: 032-860-7710, Fax: 032-862-5236, sbwoo@inha.ac.kr)

## 1. 서 론

경기만은 반 폐쇄성 해역으로 약 8 m의 평균대조차와 약 3.5 m의 평균소조차를 가지고 있다. 이러한 대조차 특성으로 인하여 점토질/사질 퇴적물이 혼재된 조간대가 광범위하게 발달되어 있으며 복잡한 해수순환 특성을 보인다(김, 1997; Park et al., 2002; 정, 2007). 담수는 한강, 임진강, 예성강으로부터 유입되며 대부분의 유입은 한강을 통해 이루어진다. 경기만으로 유입되는 담수의 연중 70% 이상이 장마기간을 포함한 6월부터 9월에 걸쳐 집중되어 계절적으로 큰 변화를 보인다.

경기만 한강 하구역은 과거부터 지속적으로 방조제 건설 및 신공항 개발, 대교 건설 등의 각종 연안개발 사업들이 진행되고 있고 최근에는 인천 조력발전의 각광지로 부각되고 있으며, 실제로 시화 조력발전소가 건설되어 현재 가동 중이다. 이러한 연안개발사업들로 인하여 경기만의 해저지형 및 해수의 유동 특성 변화가 진행되고 있으며 향후 지속적인 연안개발 압력에 따른 해양환경 변화가 예측되는 지역이다.

이러한 환경 변화의 영향을 평가/예측하고 보전 방향을 세우기 위해서 지금까지 각종의 수치모델이 사용되어 왔다. 경기만 잔차류 변동 특성에 관한 연구는 지금까지 여러 연구자에 의해 진행되어 왔으며, 김 등(2010)은 장기 정점관측을 통해서 잔차류의 시공간적 변화와 연변동성을 조사하여 담수의 유입에 따른 잔차류 변동특성이 나타난다고 제시하였다. 윤·우(2011)는 경기만 해역에서의 조석전파 특성이 인천항에서 염하수로 입구로 가면서 바닥마찰과 지형학적 수렴 정도에 따라 공간적인 진폭특성이 변한다고 제시하였으며, 송·우(2011)는 조석과 조류 관측자료를 통해서 대소조기에 따라서 잔차류의 공간적 진폭이 변화한다고 제시하였다. 임(1999)과 Park et al.(2002)은 2차원 POM(Princeton Ocean Model)을 통해 경기만에서의 평수/홍수 시의 물질수송량을 산정하였고, 이 등(2012)은 단면관측을 통하여 대조기 염하수로 남단에서 홍수기와 평수기에 단면의 잔차류 패턴과 잔차 수송량의 크기가 다르게 나타남을 제시하였다.

조간대 수치 모의에 관한 연구도 진행되어 왔는데 강 등(2004)은 MIKE21을 이용하여 조간대 모의가 수치모델 결과에 미치는 영향을 국내 해역에 적용하여 분석하였으며, 수치모의 시 조간대의 영향이 해수유동 전반을 미친다는 것을 파악하였다. 또한, 강 등(2009)은 차분법과 조간대 모의 기법이 각기 다른 EFDC, ESCORT, MIKE21의 3가지 해수유동모형을 곰소만에 적용하여 각 모델의 조간대 모의 특성을 비교 분석한 바 있다.

그러나 기존의 연구에 사용된 수치모델은 직교좌표계를 이용하는 정규 격자를 주로 사용하였으며, 정규 격자 수치모델은 고해상도의 격자 구성의 한계로 인해 경기만의 복잡한 해안선 및 조수로 지형 세밀한 재현에 어려움이 있다. 비정규 격자는 관심해역만의 해상도를 높일 수 있기 때문에 수치모델의 계산양을 효율적으로 관리 할 수 있을 뿐 아니라 정규 격자 수치모델에서는 고려할 수 없었던 조수로에서의 불규칙한 지형들도 고려할 수 있다. Chen et al.(2008)은 비정규 격자를 이용한 수치모델이 정규 격자를 이용하는 수치모델보다 섬 주변과 수로에서 조위, 조석 잔차류 등을 잘 재현하였음을 제시하였다.

지금까지의 연구에서는 조수로의 영향이 인근해역의 물질수송에 미치는 영향을 간과한 측면이 있다. 이러한 이유로서는 무엇보다 정규격자 시스템을 사용하는 한계에 그 원인을 찾을 수 있다. 본 연구에서는 삼각형 비정규 격자 체계의 수치모델 중 하나인 FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)을 이용하여 강화남단 조간대에서의 조수로의 영향이 인근 해역, 특히 염하수로의 물질수송에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 1에 본 연구 지역인 경기만 해역을 제시하였다. 이 해

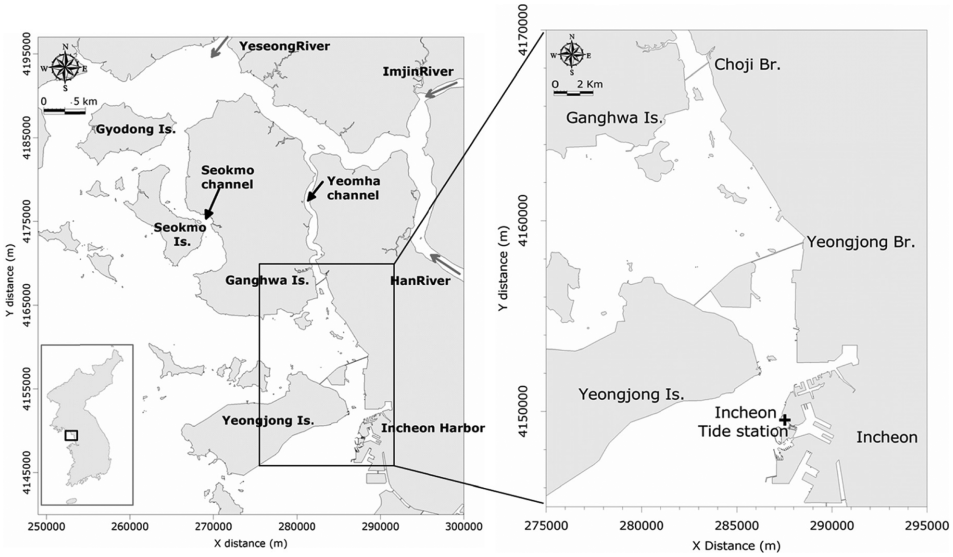



**Fig. 1.** Study area in the Gyeonggi bay. The left panel is Han River estuary and right panel is main study area.

역은 현재 대규모 조력발전 후보지로 거론되고 있으며, 조력발전소 건설 시 필요한 방조제로 인하여 인근 해역의 물질 수송이 차단될 수 있다는 점에서 많은 관심이 집중되고 있다. 이러한 물질 수송 차단으로 인한 해양 환경 변화를 예측하기 위해서는 무엇보다 현재 상태에서의 물질 수송이 어떠한 방식으로 얼마만큼 이루어 지고 있는 지에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 문제에 대하여 강화남단에서 수행했던 기존 관측자료와 수치모델적인 해석으로 답을 찾고자 하였다.

## 2. 수치모델 적용 및 결과

### 2.1 수치모델 적용

2.1.1 수치모델 개요

본 연구에 사용된 FVCOM(Finite Volume Coastal Ocean Model)은 Chen et al.(2003)에 의해 개발된 3차원 수치모델이며, 연안하구역 재현에 필수적인 조간대와 조수로 및 조습지 등에서의 유동/물질수송의 정확한 재현을 위해 3차원 질량보존 기법의 wet/dry 처리기법을 사용한다. 또한, 불규칙한 지형을 자세히 재현하기 위해 수직적으로 $\sigma$-좌표계가 사용되며, 수평적으로는 비정규 삼각격자가 사용된다. Boussinesq 근사법이 적용된 Reynolds-averaging turbulent flows에 대한 3차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial uD}{\partial x}+\frac{\partial vD}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial \sigma}=0, \sigma=\frac{z-\zeta}{H+\zeta}=\frac{z-\zeta}{D} \quad (1)$$

$$\frac{\partial uD}{\partial t}+\frac{\partial u^2D}{\partial x}+\frac{\partial uvD}{\partial y}+\frac{\partial uw}{\partial \sigma}-fvD \quad (2)$$
$$=-gD\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{gD}{\rho_o}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(D\int_o^0 \rho d\ \sigma'\right)+\sigma\rho\frac{\partial D}{\partial x}\right]+\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial \sigma}\right)+DF_x$$

$$\frac{\partial uD}{\partial t}+\frac{\partial uvD}{\partial x}+\frac{\partial v^2D}{\partial y}+\frac{\partial uw}{\partial \sigma}-fuD \quad (3)$$
$$=-gD\frac{\partial \zeta}{\partial x}-\frac{gD}{\rho_o}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(D\int_o^0 \rho d\ '\right)+\sigma\rho\frac{\partial D}{\partial y}\right]+\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right)+DF_y$$

$$\frac{\partial TD}{\partial t}+\frac{\partial TuD}{\partial x}+\frac{\partial TvD}{\partial y}+\frac{\partial Tw}{\partial \sigma}=\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_h\frac{\partial T}{\partial \sigma}\right)+D\hat{\mathrm{H}}+DF_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t}+\frac{\partial SuD}{\partial x}+\frac{\partial SvD}{\partial y}+\frac{\partial Sw}{\partial \sigma}=\frac{1}{D}\frac{\partial}{\partial \sigma}\left(K_h\frac{\partial S}{\partial \sigma}\right)+DF_S \quad (5)$$

$$\rho=\rho(T,S) \quad (6)$$

여기서,

$t$: 시간(unit: sec)

$x$, $y$, $\sigma$: 동쪽, 북쪽, $\sigma$-좌표계의 수직좌표(unit: m)

$u$, $v$, $w$: 각 $x$-방향, $y$-방향, $\sigma$-방향의 속도 성분(unit: m/s)

H, $\zeta$: 바닥으로부터의 수심($z=0$) 및 해수면 변동량(unit: m)

$D$: 총 수심($=h+\zeta$) (unit: m)

$T$, $S$, $\rho$: 수온(unit: °C), 염분(unit: psu), 밀도(unit: kg/m$^3$)

$f$, $g$: *Coriolis*계수($f\cong f_0\cong 8.82\times10^3/sec$) 및 중력가속도

$K_m$, $K_h$: 수직 난류 점성 계수와 열의 수직 난류 확산 계수

$F_u$, $F_v$, $F_T$, $F_S$: 수평방향의 운동량 및 열염의 확산계수

바닥 마찰은 퇴적층과 수층간의 경계층에서의 마찰계수를 이용한 2차 함수로 계산되며 수평 와동 점성계수로 Smagorinsky 확산계수를 사용하며 난류 확산 모델로는 Mellor & Yamada level 2.5 turbulent closure scheme을 사용하였다. 상세한 모델 설명은 Chen et al.(2003)에 제시되었다.

2.1.2 조간대 처리기법

FVCOM에서 사용되는 조간대 처리기법은 3차원 질량보존 기법을 이용하며, 기본적으로 수 층의 두께가 임계 값보다 작으면 드러난 조간대(drying)로 간주되고, 수 층의 두께가 임계 값보다 크면 해수로 덮여있는 지역(wetting)으로 간주된다.

$$\begin{cases} wet: D=H+\zeta+h_B>D_{min} \\ dry: D=H+\zeta+h_B\le D_{min} \end{cases}, \textit{for node point} \quad (7)$$

$$\begin{cases} wet: D=min(h_{B,\hat{i}},h_{B,\hat{j}},h_{B,\hat{k}})+max(\zeta_{\hat{i}},\zeta_{\hat{j}},\zeta_{\hat{k}})>D_{min} \\ dry: D=min(h_{B,\hat{i}},h_{B,\hat{j}},h_{B,\hat{k}})+max(\zeta_{\hat{i}},\zeta_{\hat{j}},\zeta_{\hat{k}})\le D_{min} \end{cases}, \quad (8)$$

*for triangular cells*

여기서,

$D_{min}$: 침수/노출을 결정하는 임계 값

$\hat{i},\hat{j},\hat{k}$ : 각 삼각요소의 3개 절점 번호

$h_B$: 강의 주수로 가장자리 지형의 높이

$\zeta$: 자유 수면 높이

삼각요소가 노출로 처리될 때 유속은 0으로 처리되고, 이때의 삼각요소는 TCE(Tracer Control Element, 주변 삼각요소의 중심점과 삼각요소와 맞닿은 변의 중간 점으로 연결된 부분) flux계산에서 제외된다.

$$\iint_{TCE}\frac{\partial \zeta}{\partial t}dxdy=-\iint_{TCE}\left[\frac{\partial(\bar{u}D)}{\partial x}+\frac{\partial(\bar{vD})}{\partial y}\right]dxdy=-\phi_l\bar{v}_N Ddl \quad (9)$$

이 기법은 침수 삼각요소와 노출 삼각요소 사이에서 이동하는 경계를 포함하는 TCE내에서 항상 질량을 보존하며 이와 같은 방법으로 tracer flux(열·염 등의 변수)와 MCE(Momentum Control Element, 각 삼각요소의 세 변) 운동 flux가 계산된다.

2.1.3 격자 구성 및 조건

격자 구성에 앞서 연구해역의 수심분포를 먼저 파악하였다. Fig. 2에 국립해양조사원에서 2011년에 발행된 수치 해도의 수심도를 제시하였으며, 수심기준은 평균해면(Mean Sea Level; MSL)이다. 실험 A와 실험 B에 대한 수심 입력 자료

로 이용하였으며, 평균해면의 등수심선은 실선으로 나타내었고, 평균해면하의 3 m, 5 m의 등수심 선은 각각 점선과 쇄선으로 나타내었다. 조간대의 지형을 좀 더 자세히 파악하고자 5 m까지 1 m간격으로 나타내었고 5 m 이하는 5 m 간격으로 제시하였다. Fig. 2에서 보이는 것과 같이 강화도 남단의 조간대에는 수심변화가 급격하고 좁은 조수로의 발달이 뚜렷하게 나타나며 염하수로 입구는 인천항 인근의 개방된 해역에서 급격히 좁아지는 형태를 보인다. 또한, 염하수로 입구의 서측 해역에서는 조간대가 발달되어 있고 수로의 서측 가장자리는 급격한 수심변화를 보인다.

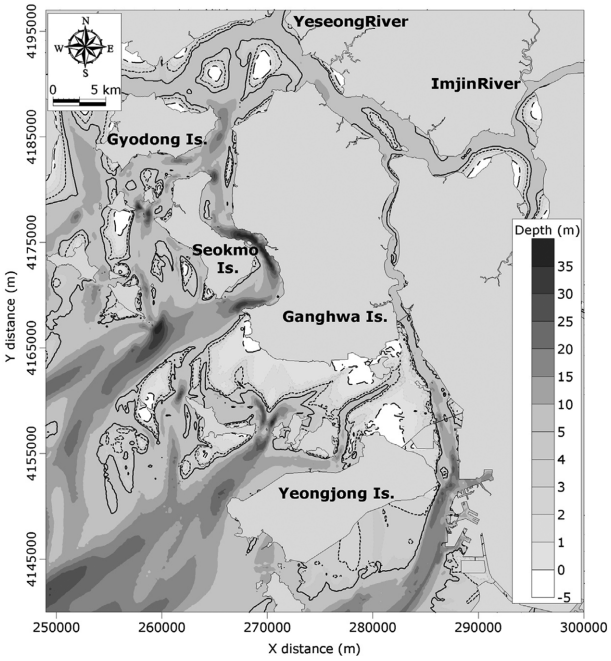



**Fig. 2.** Topographic Map of the Study with 0 m (dash line), 3 m (dotted line) and 5 m (solid line) Isobaths Shown. (Depth ref.: Mean Sea Level).

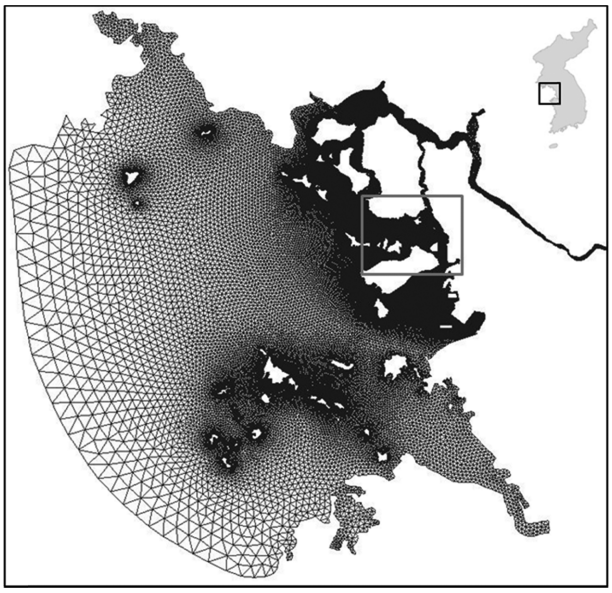


**Fig. 3.** The horizontal whole Grid. The grey box indicates main study area.

Fig. 2에서 제시된 수심 및 해안선을 이용하여 격자를 구성하였으며, Fig. 3에 전체 해역에 대한 격자도를 제시하였다. 주 관심 지역인 한강 하구역은 약 20~300 m의 해상도를 구성하였으며 주 관심지역이 아닌 외해의 해상도는 약 5 km로 구성하였다. 이는 외해에서 연안으로 들어갈수록 격자의 크기를 작아지게 구성함으로써 복잡한 해안선이 잘 재현될 수 있도록 했을 뿐 아니라 계산되는 요소의 수를 줄여 계산상의 효율성을 증가시켰다.

본 연구의 주요 목적인 강화 인근 해수 유동 순환이 미치는 조수로의 영향을 파악하기 위하여 수치모델을 두 개의 격자형태, 즉 실험 A와 B로 나누어 실험하여 각각 관측 자료와 비교하였다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 주 관심 지역에 대하여 실험 A와 B의 격자분포도를 각 제시하였다. Fig. 4(a)에 제시된 것과 같이 실험 A는 강화 남단의 조수로를 평균 해상도 100 m로 재현한 것이고, Fig. 4(b)에 제시된 바와 같이 실험 B는 급격히 변하는 수심을 잘 재현하고자 조수로의 해상도를 주변 격자보다 높게 처리하여 조수로에서의 보다 정확한 물질 수송이 이루어지게 구성한 격자이다. 전체 격자 수에 있어서는 두 실험 모두 비슷한 개수를 갖도록 조정하였으며, 격자 분포에 있어서는 조간대와 조수로를 제외한 곳에서 두 실험의 격자 분포를 정확히 일치시켰다. 실험 B의 경우 실험 A과 비슷한 절점 수를 가지지만 조수로를 고려하여 조수로가 위치한 수심 경사가 큰 곳에서 약 20 m의 공간해상도

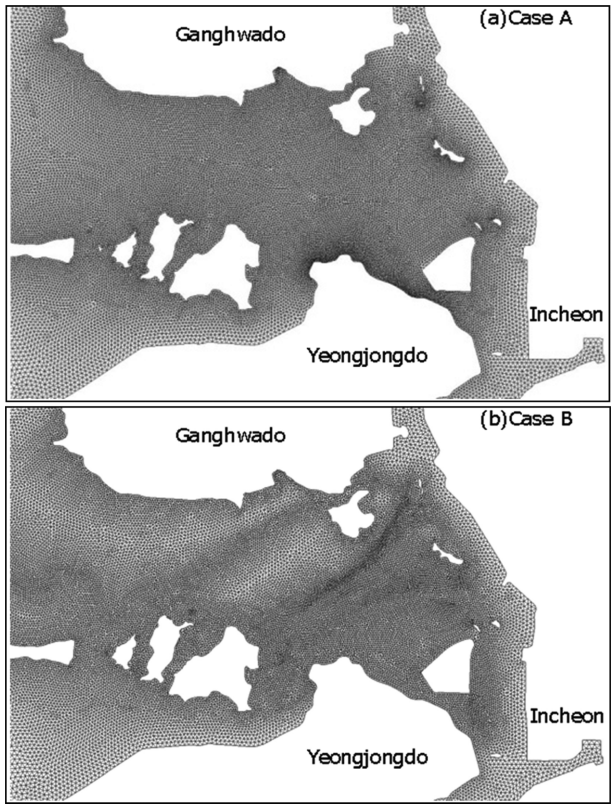



**Fig. 4.** A close up of grid around study area for Case A(up) and Case B(down).

**Table 1.** Number of nodes and elements, spatial resolution of grid for case A and Case B

| | | Case A | Case B |
|---|---|---|---|
| Model area | The number of elements | 57,444 | 61,638 |
| | The number of nodes | 109,579 | 117,965 |
| | Resolution | 100 m~5 km | 20 m~5 km |
| Main study area | The number of elements | 23,965 | 26,111 |
| | The number of nodes | 47,149 | 51,209 |
| | Resolution | 100 m | 20 ~300 m |

를, 수심 경사가 작은 간석지가 위치한 곳에서는 최대 300 m의 공간해상도를 가지도록 분배하였다. Table 1에 연구지역에 대하여 각 실험 별로 절점 수와 요소 수, 해상도를 제시하였다. 실험 A와 B에서 모든 마찰계수, 개방 경계조건 등 수치실험에 필요한 각종의 요소는 동일하게 주었으므로, 두 실험간의 차이가 발생한다면 그것은 조수로의 고려 여부에 따른 것이라고 할 수 있다. 따라서 두 실험을 비교함으로써 조수로의 지형에 따른 해상도 조절이 인근 해역의 조석과 잔차 수송량 산정에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴볼 수 있다.

외해 개방 경계조건으로 TOPEX/POSEIDON의 조석용 보정 모델인 NAO99.Jb의 기존 결과를 활용하여 주요 4개 분조($M_2$, $S_2$, $K_1$, $O_1$)의 조화상수를 선형 내삽하여 부여하였다. 조석 이외의 외력조건으로 담수유입량을 입력하였고 담수가 유출되는 지역의 위치는 Fig. 1에 제시하였다. 한강으로부터의 담수유입량은 2009년 6월 염하수로입구 남단과 영종대교 인근에서 관측한 홍수기/평수기의 단면유속관측 자료로부터 산정된 순 질량 수송량의 검증을 위하여 2009.06~2009.07까지 관측된 실제 관측 자료와 한강 홍수 통제소에서 제공하는 팔당댐의 방류량을 활용하여 산정하였다. 예성강의 담수 유입량은 한강 담수 유입량의 유입 면적 비를 계산하여 산정하였고, 임진강의 담수 유입량은 군남/전곡의 유량을 활용하여 산정하였다(윤, 2006). Table 2에 수치모델에 적용한 담수유입량을 제시하였다.

모델의 초기 수위는 평균해면(Mean Sea Level)을 부여하였으며 초기 수온과 염분은 전 해양이 균질하다는 가정 하에 전 층에 대하여 일정한 값(15°C, 30 psu)을 부여하였다. 수치계산 시간 간격은 외부모드의 경우, CFL(Courant-Friendrichs-Lewy)조건을 만족시키는 0.5초를 부여하였고, 내부 모드의 경우 5초로 부여하였다. 수직 층은 11개로 부여하여 수심이 얕은 조간대에서도 일정한 수직 해상도를 유지할 수 있도록 하였다. Wet/dry switch depth는 모델의 안정성 및 정확성을 고려하여 강(2009)등이 제시한 EFDC의 노출심 한계설정 값인 0.07 m보다 작은 0.05 m로 부여하였고, 모의 기간은 안정화 기간과 외해 개방 경계 조건으로 입력한 주요 4개 분조가 충분히 분해될 수 있도록 고려하여 총 40일로 산정하였다.

**Table 2.** Information of river discharge

| River | River dischage (CMS) |
|---|---|
| Han | 300 |
| Imjin | 100 |
| Yeseong | 30 |

## 2.2 수치모델 결과

이·우(2012)에 의해 수행된 염하수로 입구(Line 1)와 염하수로 남단(Line 2)의 단면유속관측자료와 수치모델의 결과를 비교·분석하기에 앞서, 이 지역의 공간적 유속분포를 파악하기 위해 Fig. 5와 Fig. 6에 실험 별 유속분포도를 조위와 같이 제시하였다. Fig. 5에는 낙조 시 유속분포를 제시하였으며 Fig. 6에는 창조 시 유속분포를 제시하였다. Fig. 5에서 (a)와 (b)는 실험 A의 유속분포이며 (c)와 (d)는 실험 B의 유속분포를 나타내며 제시된 유속분포의 조시는 고조 후 2시간((a), (c)), 저조 시((b), (d))이다. 조수로의 지형이 존재하는 지역의 고조 후 2시간 후의 유속분포를 실험 별로 비교해보면 실험 A와 실험 B 모두 낙조하는 방향의 유속을 가지지만, 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절한 실험 B가 실험 A에 비해 상대적으로 약한 유속을 보이면서 좁은 수로의 형태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 저조 시의 유속분포를 비교해

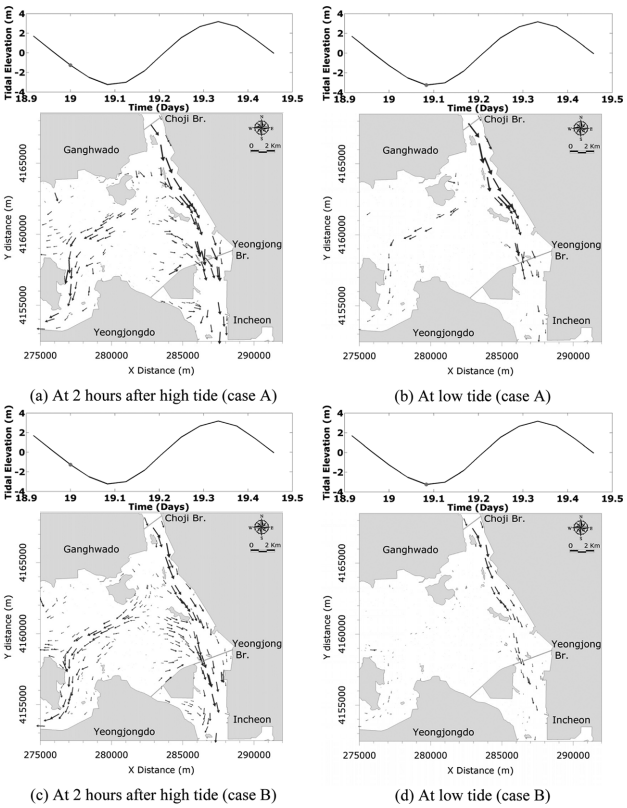



**Fig. 5.** The spatial velocity for ebb at study area. (a) case A at 2 hour after high tide, (b) case A at low tide, (c) case B at 2 hour after high tide, (d) case B at low tide.

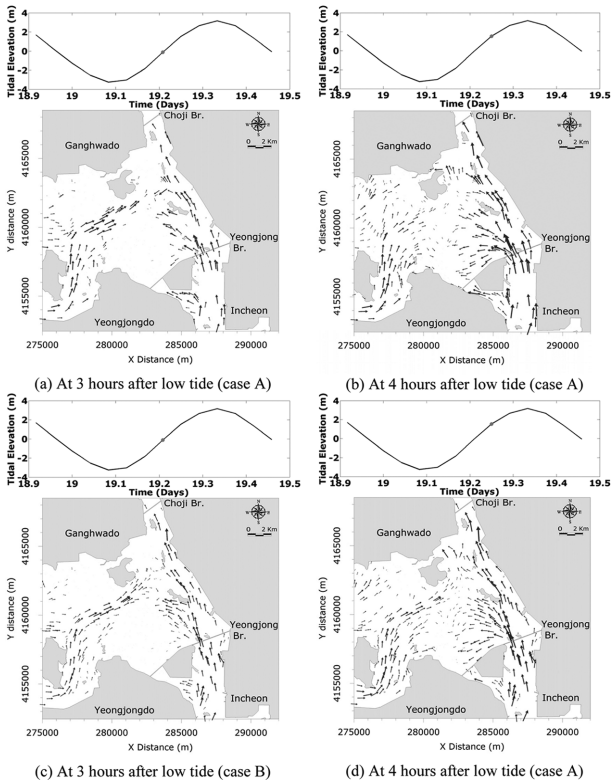



**Fig. 6.** The spatial velocity for flood at study area. (a) case A at 3 hour after low tide, (b) case A at 3 hour after low tide, (c) case B at 4 hour after low tide, (d) case B at 3 hour after low tide.

보면 실험 A는 낙조하는 흐름을 보이는 반면 실험 B는 흐름이 거의 존재하지 않음을 보인다.

Fig. 6은 Fig. 5와 마찬가지로 (a)와 (b)는 실험 A의 유속분포이며 (c)와 (d)는 실험 B의 유속분포를 나타내며 제시된 유속분포의 조시는 저조 후 3시간((a),(c)), 저조 후 4시간((b),(d))이다. 저조 후 3시간 후의 유속분포를 실험 별로 비교해 보면 낙조 시의 유속분포와 마찬가지로 실험 A와 실험 B 모두 창조하는 방향의 유속을 가지지만, 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절한 실험 B가 실험 A와 비슷한 유속을 보이면서 좁은 수로의 형태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 저조 후 4시간 후의 유속분포를 보면 실험 A는 수로의 형태를 유지하지 못하지만 실험 B는 좁은 수로의 형태를 유지하면서 실험 A에 비해 상대적으로 강한 유속을 보인다.

이를 통하여 조수로의 지형이 존재하는 지역에서 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절한 실험 B가 일정한 해상도를 갖는 실험 A에 비하여 흐름이 좁은 수로의 형태를 유지하는 지속시간이 긴 것을 알 수 있다.

## 2.3 수치모델 검증

### 2.3.1 조석

모델 조석 보정 및 검증을 위해 경기만 전 영역에서의 47개 지점에 대한 조석조화상수가 수집되었고 수집된 조화상수 자료는 각 영역별의 원활한 비교를 위하여 외해개방경계지역

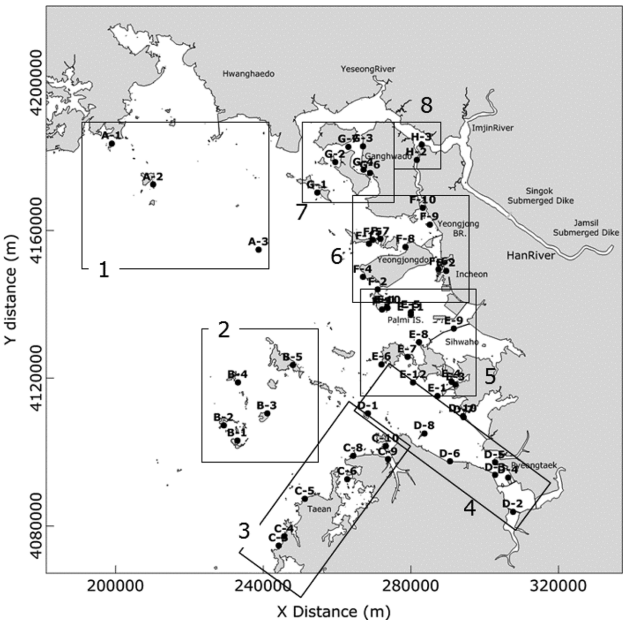



**Fig. 7.** The circle (•) denote the tide station observed tidal constituents. And boxes is Indicated the regions. (1, 2, 3: open boundary region, 4, 5, 6: Coastal region, 7, 8: Estuary region).

(1, 2, 3 지역), 연안지역(4, 5, 6 지역), 하구지역(7, 8 지역)으로 구분하였다(Fig. 7). 수집된 조화상수들은 Kang(1995)이 제시한 조화상수의 계절적 변동 및 관측기간 등의 차이로 인해 비슷한 위치의 자료임에도 각 분조의 반조차 및 지각의 차이가 있기에 장기관측 자료를 확보한 정점에 한해 연보정을 실시하여 월 변동 특성에 따른 차이를 최소화하였다. 국립해양조사원/한국해양연구원과 같은 공신력 있는 기관의 자료를 바탕으로 수집된 조화상수들은 캐나다 해양연구소 Foreman (1977)에 의해 개발된 IOS Package를 이용한 조화분해를 통해 계산되었다.

Fig. 8에 47개 정점에 대한 각 실험 별 관측치와 모델치의 $M_2$분조의 진폭과 위상의 상관관계를 제시하였으며, 각 실험 별로 결정계수를 산정해 본 결과 실험 B의 결정계수는 0.97로 높은 상관성을 보인 반면, 실험 A의 결정계수는 0.88로 실험 B에 비해 다소 낮은 상관성을 보였다.

또한 $M_2$분조의 진폭에 대한 평균제곱근오차와 절대상대오차를 아래 식의 방법으로 산출하여 구역 별로 비교하였다.

$$\mathrm{ARE} = \left|\frac{\mathrm{Modeled}-\mathrm{Observed}}{\mathrm{Observed}}\right| \times 100 \tag{10}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{(n=1)}^{n}(\mathrm{Modeled}-\mathrm{Observed})^2}{n}} \tag{11}$$

절대 상대 오차는 모델 결과의 절대적 크기가 관측 자료에 비하여 얼마나 어긋났는지에 대한 척도를 백분율로 표현한 것이며, 평균제곱근오차는 정량적으로 관측치와 수치해 사이의 차이를 표시하는데 특히 제곱근 방식을 사용함에 따라 오차의 편차가 심할수록 그 값들이 커진다는 특징이 있다. 조수

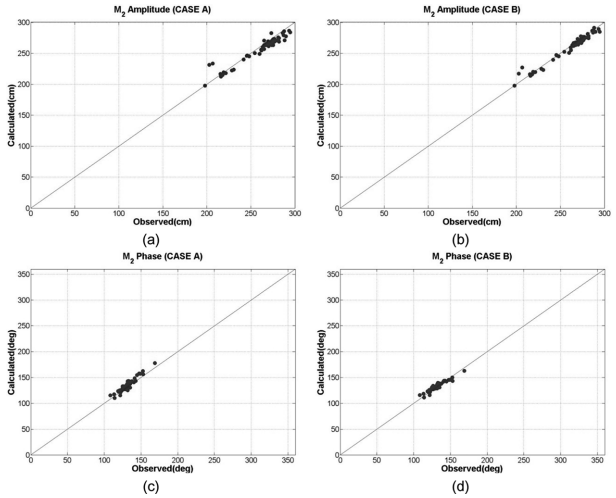



**Fig. 8.** Comparison M2 amplitude ((a), (b)) and phase ((c), (d)) between observation data (x-axis) and model results (y-axis) (left: case A, right: case B).

**Table 3.** The ARE(Absolute Relative Error) for M2 amplitude at each regions

| Error | Case | Group | | | | | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| ARE (%) | A | 0.3 | 1.6 | 1.4 | 2.0 | 1.7 | 2.9 | 3.5 | 13.5 | 3.4 |
| | B | 0.2 | 1.4 | 1.1 | 1.3 | 1.0 | 1.2 | 1.6 | 8.4 | 2.0 |
| RMSE (cm) | A | 0.8 | 4.2 | 4.2 | 6.6 | 4.7 | 8.9 | 10.0 | 27.7 | 8.4 |
| | B | 0.5 | 3.8 | 3.4 | 5.0 | 3.3 | 4.1 | 4.8 | 17.5 | 5.3 |

로를 고려한 실험 B가 절대상대오차 2.0%, 평균제곱근오차 3.4 cm를 보였고 조수로를 고려하지 않은 실험 A가 절대상대오차 3.4%, 평균제곱근오차 8.3 cm를 보여 실험 B가 실험 A에 비해 더 적은 오차률을 보였다.

외해 개방 경계지역(1, 2, 3 지역)의 두 실험의 절대상대오차는 큰 차이를 보이지 않은 반면, 연안으로 들어올수록 오차의 범위가 커지면서 하구지역(7, 8 지역)의 경우에는 실험 A에서 각 3.5, 13.5 값의 오차를 보였고 실험 B에서 각 1.6, 8.4의 값을 보여 약 40%의 개선 효과를 보였다. 연안지역(4, 5, 6 지역)에서도 두 실험간의 절대상대오차는 상대적으로 약 40%의 차이를 보이며, 조수로를 고려한 실험 B가 실험 A에 비해 관측 값에 근접한 값을 보였다(Table 3).

이상을 정리하면 격자 구성 시 강화도 남단 조수로의 해상도를 높인 실험 B가 실험 A에 비해 연안역 및 하구역 특히 7, 8 지역에서 관측 값에 근사한 결과를 보여주었으며 이를 통하여 조간대 모의 시 조수로 지형이 충분히 반영될 수 있도록 격자를 구성해야 하며, 조간대를 통과하는 해수 유동, 수질 등의 수치모의 시 바닥 지형을 충분히 반영할 수 있는 격자 구성의 필요성이 확인되었다.

### 2.3.2 Landsat-7 자료

수치모델의 검증을 위해 기존의 조화상수를 이용하는 방법은 특정 정점에서의 조석의 시간적인 분포에 대한 검증이라 할 수 있기 때문에, 공간적인 분포에 대한 검증을 하기엔 어려움이 있다. 시간에 따른 수위의 공간적인 분포 변화를 파악하기 위하여 본 연구에서는 비교적 구하기 쉽고 30 m의 공간해상도를 가지는 인공위성 Landsat-7의 영상자료를 활용하여 강화도 남단 해역에서의 수위의 공간적인 분포에 대한 비교를 실시하였다.

Landsat-7 위성에 탑재되어 있는 ETM+ 센서는 모두 8개의 분광밴드를 가지고 있으며, 본 연구에서는 물에 모두 흡수되는 특징을 가지고 있는 근적외선(4번) 밴드를 사용하였다. 2008년 4월~2011년 5월 사이에 관측된 Path116/Row34 지역의 영상을 사용하여 강화도 남단 조간대 영역(북위 37.49~37.64, 동경 126.35~126.61)에서의 수륙경계선을 추출하였다. 여기서 Path는 위성체의 비행경로 Row는 촬영순번을 나타내며, 이 위치에서 촬영된 영상은 서울/경기 수도권 일대 및 경기만 일대를 포함한다. 수집된 영상 중 연구 해역에 구름의 영향이 있는 영상은 제외하였고, 비슷한 수위의 영상들에 대해서는 연구 해역이 제일 깨끗하게 촬영된 영상을 육안으로 판단하여 대표 영상으로 선정하였다. 이러한 방법으로 조위 변화에 따른 해수면 변동 특성을 가장 뚜렷하게 파악할 수 있는 6개의 영상을 선정하였다. 선정된 6개의 영상에 대하여 영상이 촬영된 시기의 인천항 조위를 Table 4에 제시하였다.

Landsat-7 영상으로부터 수륙경계선 추출 시 사용한 방법은 일반적으로 해안선 추출에 사용되는 Frazier and Page(2002)에 의해 제안된 density slicing 방법으로 Density slicing 방법은 물과 육지의 경계를 이루는 DN값(Threshold value: 역가)을 찾아내어 해안선을 추출하는 방법이다(Ryu et al., 2002). 이 방법을 통하여 추출된 수륙경계선의 수위는 국립해양조사원에서 제공하는 인천 조위 관측소의 1시간 간격 자료를 활용하여 영상이 촬영된 시점과 일치하는 시점의 조위를 수륙경계선의 수위라 가정하였다. 위의 방법을 적용하여 6개의 영상에서 추출한 수륙경계선을 Fig. 9에 제시하였다. Fig. 9에

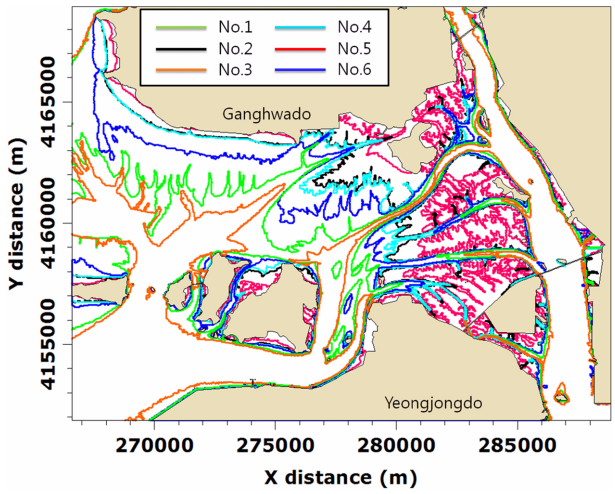



**Fig. 9.** The color lines is extracted waterlines from the six satellite image during 2008.04.03~2011.05.14.

**Table 4.** Time, tidal elevation at Incheon tidal station for Landsat-7 satellite images observed

| | Line color | Observed time | Tidal elevation (cm) | | Line color | Observed time | Tidal elevation (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Green | 2008.04.03 11:01 | 323 | 4 | cyan | 2011.03.11 11:04 | 501 |
| 2 | Black | 2009.02.01 11:00 | 515 | 5 | Red | 2011.04.12 11:04 | 667 |
| 3 | Brown | 2011.01.06 11:04 | 81 | 6 | Blue | 2011.05.14 11:04 | 497 |

서 위성으로부터 관측된 시간 순으로 번호를 지정하였고 수위에 따른 수륙경계선을 구분하기 위해 6개의 수륙경계선을 각기 다른 색으로 나타내었다. 각 번호에 해당하는 수륙경계선을 추출할 때 사용된 영상이 촬영된 시간과 그 시간의 인천항 조위를 Table 4에 제시하였다.

Fig. 10에 실험 B에서 모의된 수위와 Landsat-7 영상에서 추출한 수륙경계선을 낮은 수위에서 높은 수위 순으로 제시하였다. 수치모델을 통해 모의된 인천항 정점에서의 해수위와 Landsat-7 영상이 촬영된 시각의 해수위가 일치하는 시점을 찾아 그 시점의 해수위 공간분포를 비교해본 결과, 수위가 낮은 저조 시의 전반적인 공간분포 패턴을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있었지만 수위가 높아질수록 해수위 분포의 불일치가 나타남을 알 수 있었다.

이는 격자 구성 시 강화도 남단에 위치하고 있는 수로는 충분히 고려하였지만 영종도 북단에 위치한 조간대의 복잡한 지형은 고려하지 않았기 때문이라 사료된다. 추후 연구를 통해 영종도 북단에 위치하고 있는 조간대의 복잡한 지형까지 고려한 실험을 진행하여 이에 대한 영향을 분석할 예정이다. 또한, 인천항 조위관측소에서 관측된 수위를 위성영상에서 추출한 수륙경계선의 수위라고 가정하는 한계를 지니고 있기 때

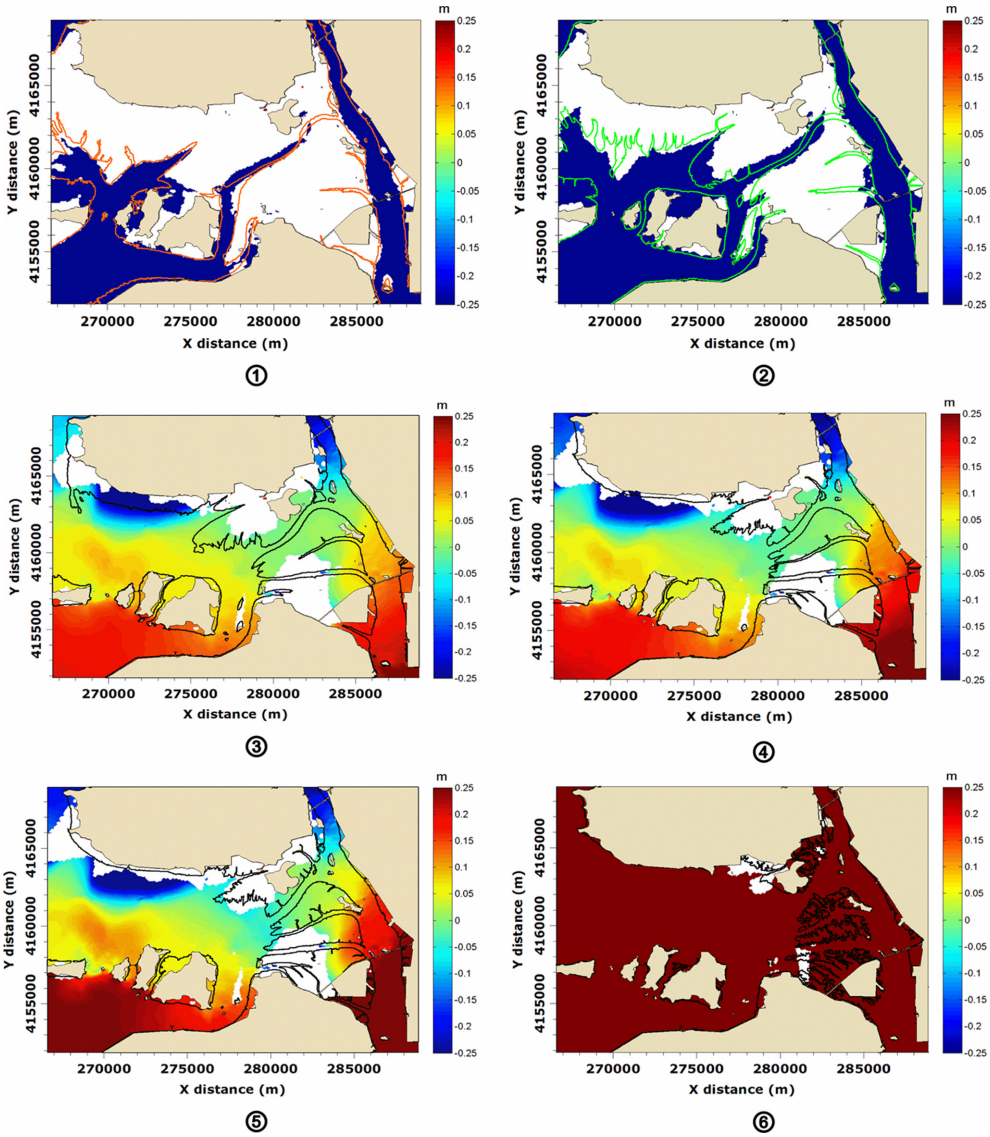



**Fig. 10.** The Spatial distribution of simulated tidal elevation (contour) and waterline extracted from Landsat-7 image.

문에, 추후 연구를 통해 수위 기준점을 확보하고 Landsat-7 보다 고해상도의 위성영상자료를 확보한다면 이 검증 방법에 대한 한계는 해결될 것이라 판단된다.

## 3. 분 석

조석 조화상수를 이용하여 보정 작업을 마친 수치모델을 검증하기 위해 한강 하구역에서 관측된 단면유속자료를 확보하였다. 염하수로 입구(초지대교 인근: Line 1)와 염하수로 남단(영종대교 남단: Line 2)에서 ADCP를 이용하여 2009년 6월 Line 1 소조기 및 대조기, Line 2 소조기 관측, 2010년 10월 Line 2 13시간 관측이 수행되었다. 단면유속관측 위치는 Fig. 12에 실선과 점선으로 표시하였으며, 강화도 초지대교 인근에 위치한 굵은 실선은 Line 1(염하수로 입구)의 위치이고 영종도 영종대교 남단에 위치한 굵은 점선은 Line 2 (염하수로 남단)의 위치를 나타낸다. 이·우(2012)는 이 단면유속 자료로부터 Sylaios and Boxall(1988)이 제안한 잔차수송량 계산방법을 이용하여 잔차 수송량을 계산하였다. 이·우(2012)가 단면유속자료를 통해 산정한 Lagrangian 잔차 수송량은 Line 1 대조기 소조기에 각 576 cms, 67 cms의 낙조 잔차 수송량을 보인 반면, Line 2 대조기 소조기 각 359 cms, 248 cms의 창조 잔차 수송량을 보였다.

이·우(2012)의 연구와 마찬가지로 각 실험 별로 관측시기에 인천항 조위관측소에서 관측된 조위 자료를 활용하여 수치모의를 통해 얻은 조위의 대/소조기에 해당하는 시간을 구하였다. 단면관측시의 인천항 조위 자료와 모델에서 계산된 조위를 비교하여 가장 일치하는 시기를 산정하였고, Fig. 11에 모델에서 계산된 인천항 위치에서의 조위를 제시하였다. 여기서 점선은 대조기 Line 1, Line 2에서의 산정 시기, 실선은 소조기 Line 1, Line 2의 산정 시기를 나타낸다.

이렇게 얻은 관측시간 동안의 Line 1과 Line 2에 해당하는 격자에서의 유속과 수심, 각 격자간의 거리를 구해 Sylaios and Boxall(1988)의 계산 방법을 이용하여 각 단면에 대한 잔차 수송량을 계산하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$\langle \Sigma_{n=1}^{M} u_m a_m \rangle = \Sigma_{n=1}^{M} \langle u_m \rangle \langle a_m \rangle + \Sigma_{n=1}^{M} \langle U_m A_m \rangle \quad (12)$$

$$U = u - \langle u \rangle \quad (13)$$

$$A = a - \langle a \rangle \quad (14)$$

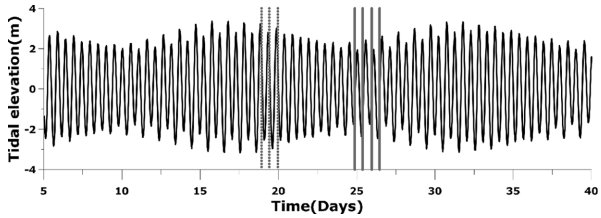



**Fig. 11.** Simulated tidal elevation at Incheon Harbor. Dash and solid lines is indicated estimation period at spring tide and neap tide respectively.

여기서<>는 조석평균 값이고, $M$은 sigma 격자 별 총 셀의 개수, $m$은 각 셀을 의미한다. 각 격자 별 유속을 시간 평균한 값 <$u$>과 격자 별 면적을 시간 평균한 값 <$a$>을 곱한 뒤 공간적으로 합한 값을 Eulerian 순 잔차 수송량으로 정의하고, 유속 원시자료($u$)에서 시간 평균된 유속(<$u$>)과 원시자료의 면적 값($a$)에서 시간평균 한 면적 값(<$a$>)을 곱하여 공간적으로 합한 값을 Stokes drift 순 잔차 수송량이라 정의한다. 또한, 이 두 항의 합을 Lagrangian 순 잔차 수송량이라 정의한다.

위의 식을 이용하여 각 항 별로 계산한 순 잔차 수송량을 Fig. 12에 도식하였다. Fig. 12에서 각 정선 별 잔차 수송량의 방향에 대해 화살표로 표시하였고, 각 항 별로 계산된 값들 중 –는 창조방향의 크기, +는 낙조방향의 크기를 의미한다. 영종도와 강화도 남단 사이의 단면 잔차 수송량은 Line 1과 Line 2에서의 각 항의 크기차이를 구하여 유추하였다.

각 단면에서의 각 실험 별 Stokes drift 순 잔차 수송량은 대조기에 Line 1과 Line 2 모두 약 2배 이상의 큰 값을 보였고, 소조기에는 Line 1과 Line 2 모두 거의 일정한 값을 보여주었다. 각 실험 별 Line 1에서의 Euler 순 잔차 수송량는 대/소조기 모두 낙조하는 흐름을 보였으며, 크기는 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절하지 않은 실험 A가 실험 B에 비해 약 2배 이상의 큰 값을 보였다. 각 실험 별 Line 2에서의 Eulerian 순 잔차 수송량도 대/소조기 모두 낙조하는 흐름을 보인 반면 크기는 실험 A가 실험 B에 비해 약 3배 이상 큰 차이를 보였다. Lagrangian 순 잔차 수송량은 두 실험 모두 Line 1 대/소조기에 낙조흐름을 보인 반면, Line 2 대조기에는 두 실험 모두 창조 흐름을 보이지만 소조기에 실험 A가 낙조 흐름을 보였다. Line 1과 Line 2의 차이로 구한 강화도 남단 사이의 순 잔차 수송량을 유추해본 결과, 소조기에 실험 A가 창조하는 흐름을 보인 것을 제외하면 대/소조기에 두 실험이 낙조하는 흐름을 보였다.

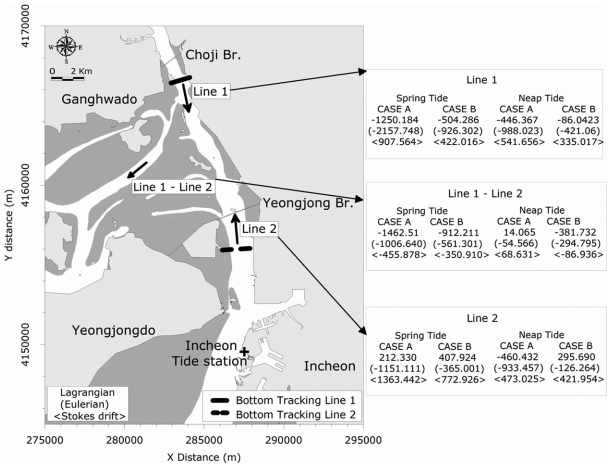



**Fig. 12.** Net volume transport at cross-section (Line 1, Line 2) during 13 hours. It is calculated at black lines of numerical model. Arrow indicated to transport direction. And positive and negative values indicated to flooding and ebbing directions, respectively.

이는 임(1999)과 Park et al.(2002), 윤 · 우(2012), 이 · 우(2012) 등이 제시한 염하수로의 잔차 수송량은 낙조하는 흐름, 영종대교 입구에서의 잔차 수송량은 창조하는 흐름을 가진다는 연구 결과와 부합하며 또한 수렴에 의해 강화도 남단 사이로 낙조하는 흐름의 잔차 수송량이 나타난다는 연구결과와도 부합한 것으로 판단되지만 이는 직접적인 현장관측 값과의 비교가 이루어지지 않았다는 한계를 가지고 있다.

이 · 우(2012)가 산정한 잔차 수송량과 본 연구에서 산정된 잔차 수송량의 크기를 비교한 결과를 Fig. 13~15에 제시하였다. Fig. 13에 대조기, 소조기 시의 Line 1에서의 잔차 수송량의 크기를 각 실험 별, 각 항 별로 제시하였다. 검은색과 회색 막대그래프는 각각 Langrangian 순 잔차 수송량과 Eulerian 순 잔차 수송량을 나타내며, 점선의 막대그래프는 Stokes drift 순 잔차 수송량을 나타낸다. 마찬가지로 Fig. 14에 Line 2에서의 순 잔차 수송량의 크기를 제시하였으며, Fig. 15에는 Line 1과 Line 2사이에서의 수렴에 의한 순 잔차 수송량을 크기를 제시하였다. 각 실험 별 각 항마다 정도의 차이는 보이지만 전반적으로 조수로의 지형에 따라 해상

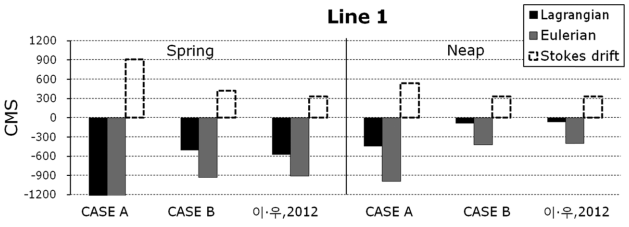



**Fig. 13.** Residual volume transport rates at Line 1. Boxes is indicated Lagrangian (black box), Eulerian (grey box), Stokes drift (dash line box) residual volume transport, repectively. Positive and negative values indicate flood and ebb directions.

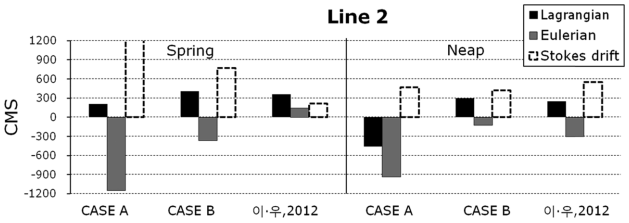



**Fig. 14.** Residual volume transport rates at Line 2. Boxes is indicated Lagrangian (black box), Eulerian (grey box), Stokes drift (dash line box) residual volume transport, repectively. Positive and negative values indicate flood and ebb directions.

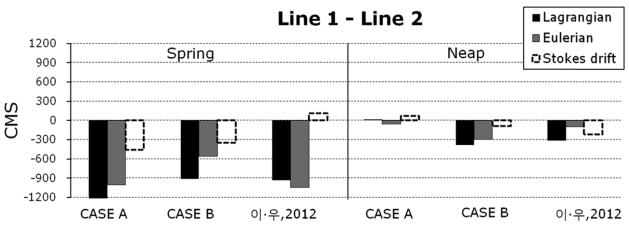



**Fig. 15.** Residual volume transport rates at Line 2-Line 1. Boxes is indicated Lagrangian (black box), Eulerian (grey box), Stokes drift (dash line box) residual volume transport, repectively. Positive and negative values indicate flood and ebb directions.

도를 조절하지 않은 실험 A가 해상도를 조절한 실험 B보다 약 2배 이상 과다산정 된 경향을 볼 수 있으며, 실험 B에서 산정된 순 잔차 수송량이 관측을 통해 산정된 것과 비슷한 결과를 보였다. 하지만 Line 2 대조기의 Eulerian 순 잔차 수송량의 흐름은 두 실험 모두 관측을 통해 산정된 것과 반대 방향이 나타났고, 이에 대한 원인 분석은 추후 연구에서 진행 할 예정이다.

## 4. 결 론

조간대 수치모의 시 격자 구성에 있어 조간대 조수로 지형에 따라 해상도를 조절하는 것이 전체 해수 유동에 미치는 영향을 파악하기 위해 비정규 삼각 격자 체계의 FVCOM을 경기만에 적용하였다. 격자 구성 시 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절하지 않은 실험 A와 조수로의 지형에 따라 해상도를 20~300 m로 조절한 실험 B를 수행하였고, 강화도 남단 해역의 수위에 대하여 한 조석 주기 동안의 공간적 분포를 Landsat-7 영상자료와 비교하였다. 한 조석 주기에 해당하는 시간에 따른 수위변화의 공간적 분포 패턴은 전반적으로 잘 재현되었음을 알 수 있었지만 수륙경계선 추출 시 기준 수위를 인천항의 조위로 가정하였기 때문에 정확한 검증을 하기엔 어려움이 있었다. 이는 추후 연구를 통해 기준점을 확보한다면 해결될 수 있을 것이다.

또한 47개의 정점에서 관측된 자료를 IOS Package을 이용하여 조화분석을 통해 조화상수를 수집하였다. 이를 수치모델 모의를 통해 얻은 각 실험 별 $M_2$분조의 진폭과 위상의 상관 관계를 비교해 본 결과 실험 B의 결정계수는 0.97로 높은 상관성을 보인 반면, 실험 A의 결정계수는 0.88로 실험 B에 비해 다소 낮은 상관성을 보였다. 수집된 조화상수를 원활한 비교를 위해 외해개방경계구역, 연안지역, 하구지역으로 구분하여 비교해 본 결과 실험 A와 실험 B의 오차가 한강 상류와 석모수로 해역에서 약 40% 이상 차이를 보였다. 이는 격자 구성 시 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절하는 것이 한강 하구역에 큰 영향을 미친다는 것을 의미하고, 이를 통하여 강화도 남단의 조수로 지형을 충분히 반영할 수 있는 격자를 구성해야 하는 필요성을 확인할 수 있다.

본 연구에서 구축한 수치모델의 검증을 위해 염하수로 입구와 염하수로 남단에서 2009년 6월과 2010년 10에 관측한 ADCP 단면 유속자료를 확보하였고 이 단면유속자료로부터 Sylaios and Boxall(1988)이 제안한 잔차 수송량 계산방법을 이용하여 잔차 수송량을 계산한 자료도 확보하였다. 현장 관측 값을 통해 산정한 Lagrangian 순 잔차 수송량은 Line 1 대조기 소조기에 각 576 cms, 67 cms의 낙조 잔차 수송량을 보인 반면, Line 2 대조기 소조기 각 359 cms, 248 cms의 창조 잔차 수송량을 보였다. 각 실험 별로 산정된 Lagrangian 순 잔차 수송량은 각 항마다 정도의 차이는 보이지만 전반적으로 조수로의 지형에 따라 해상도를 조절하지 않은 실험 A

가 해상도를 조절한 실험 B보다 약 2배 이상 과다산정 된 경향을 볼 수 있으며, 실험 B에서 산정된 Lagrangian 순 잔차 수송량은 Line 1 대조기/소조기에 각 504 cms, 86 cms의 낙조 잔차 수송량을 보인 반면 Line 2 대조기 소조기에 각 408 cms, 296 cms의 창조 잔차 수송량을 보였다. 이는 격자 구성 시 조간대의 조수로 지형에 따른 해상도의 조절이 조간대 모의뿐 만 아니라 수치모델의 전체 해수 유동장에도 영향을 미친다는 것을 의미하고, 넓은 조간대 및 조수로 지형을 가진 지역에서의 물질 수송량 특성을 이해하기 위해서는 조수로 지형을 충분히 반영할 수 있도록 격자를 구성해야 한다는 것을 의미한다.

## 감사의 글

이 논문의 문제점과 보완 방향에 대해 건설적인 지적을 해주신 익명의 심사자 두 분께 감사를 드립니다. 이 논문은 2013년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해수순환 및 생태계변화 예측기술 개발(경기만 해역을 중심으로), 경기씨그랜트사업).

## 참고문헌

강주환, 문승록, 박선중 (2004). 해수유동 모형에서 조간대모의의 필요성. 대한토목학회논문집, 24(3-B), 269-265.

강주환, 박선중, 김양선, 소재귀 (2009). 해수유동모형의 조간대 특성. 한국해안 · 해양공학회논문집, 21(5), 357-370.

김창식, 임학수, 김진아, 김선정, 박광순, 정경태 (2010). 경기만 조석 잔차류 산정 및 변동성. 한국해안·해양공학회논문집, 22(6), 353-360.

김홍선 (1997). 경기만에서의 해수 유동과 염분 분포에 대한 수치 모델링. 석사학위논문, 인하대학교.

윤병일, 우승범 (2011). 조석 전파 특성을 활용한 한강하구 주요 수로의 지형학적 수렴과 바닥 마찰 간의 관계에 대한 연구. 한국해안 · 해양공학회논문집, 23(5), 383-392.

윤병일, 우승범 (2012). 한강하구 수로별 순 수송량과 대소조기 변화에 따른 염하수로의 순 수송량 변동에 관한 수치해석적 연구. 한국해안 · 해양공학회논문집, 24(4), 257-268.

이동환, 윤병일, 김종욱, 구본호, 우승범 (2012). 단면 관측을 통한 경기만 염하수로의 대조기 평수시와 홍수시 유출입량 변화특성 조사. 한국해안 · 해양공학회논문집, 24(1), 16-25.

이동환, 우승범 (2012). 경기만 염하수로에서의 mass flux 특성 분석. 한국해안 · 해양공학회(심사중).

임효혁 (1999). 경기만에서 수치모델링을 이용한 한강수 유입 연구. 석사학위논문, 인하대학교.

정정호 (2007). 3차원 수치모델을 이용한 경기만 해수의 시공간적인 수리학적 거동과 환경조건변화에 대한 예측 모델링 연구. 박사학위논문, 광운대학교.

Chen, C., Liu, H. and Beardsley, R.C. (2003). An unstructured, finite volume, three-demensional, primitive equation ocean model: Application to Coastal ocean and estuaries. Journal of Atmos. Oceanic Technol., 20, 159-186.

Chen, C., Qi, J., Li, C., Beardsley, R.C., Lin, H., Walker, L. and Gates, K. (2008). Complexity of the flooding/drying process in an estuarine tidal-creek salt-marsh system: An application of FVCOM. Journal of Geophysical Research, Vol. 113.

Frazier, P.S. and Page, K.J. (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM data. Photogrammetric engineering and Remote Sensing, 66, 1461-1467.

Ryu, J.-H., Won, J.-S. and Min, K.D. (2002). Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat a case study in Gomso Bay, Korea. Remote Sensing of Environment 83, 442-456.

Kang., S.K. (1995). Seasonal variability of the M2 tide in the seas adjacent Korea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 56, 187-196.

Foreman, M.G.G. (1997). Manual for tidal heights: analysis and prediction. Pacific Marine Science Report, 77-10., Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C., Canada.

Park, K., Oh, J. H., Kim, H. S. and Im, H. H. (2002). Case study: Mass Transport Mechanism in Kyunggi Bay around Han River Mouth. Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), 257-267.

Sylaios, G. and Boxall, S. R. (1988). Residual currents and flux estimates in a partially mixed estuary, Est. Coastal Shelf Sci., 46, 671-682.

원고접수일: 2011년 12월 29일
수정본채택: 2012년 10월 22일 (1차)
2013년 2월 13일 (2차)
게재확정일: 2013년 3월 13일