

남해안의 조위 및 조류거동 수치모의 Numerical Simulation for Behavior of Tidal Elevation and Tidal Currents in the South Sea

권석재* · 강태순**

Seok Jae Kwon* and Tae Soon Kang**

요 지 : 본 연구의 대상영역인 남해안의 조위 및 조류 수치모의를 위해 조석 보정용 모델인 NAO.99의 기존결과를 외에 개방경계 조건에 적용하였다. 조건대를 고려할 수 있고 σ -좌표계를 사용하는 EFDC 모형을 이용하여 2 km의 직교 정격자와 0.5~2.0 km의 가변직교격자를 사용한 두 개의 격자망을 구축하였다. 조위수치모의 결과에서 예측값과 국립해양조사원 조위검조소의 관측값이 잘 일치하였으며 남해안 동측에서 서측으로의 조석의 전파를 보여주었다. 검증 결과 격자크기가 감소할수록 조위관측 자료와 더 높은 상관관계를 보였으며 0.5 km의 격자크기로 인한 수치모의 결과가 내만의 협수로 및 지형의 영향을 크게 받는 조류를 다소 과소 산정하는 경향을 가지는 반면에 넓은 수로 및 외해역 자료의 경우에는 2 km 격자로 조류의 적절한 재현이 가능하였다.

핵심용어 : 남해안, 조위 및 조류, 수치모의, EFDC 모형

Abstract : This study applied the previous results of the NAO model, a tidal correction model, to the open boundary condition for the behavior of tidal elevation and tidal currents in the South Sea. This study used the EFDC model considering the wetting and drying problem and using the σ -coordinate as a vertical coordinate and generated two mesh cases of the constant grid size of 2.0 km and the variable grid size of 0.5~2.0 km. The numerical results for the tides showed that the predicted results were in quite good agreements with the observational data acquired from the tidal stations of the NORI. The predicted tides were observed to propagate from the east area to the west area in the South Sea. The verification results reveal that the numerical results are more correlated with the measured tidal data as the grid size decreases. The grid size of 2 km results in proper simulation of tidal currents in wide waterway and offshore area whereas the numerical results from the grid size of 0.5 km tend to somewhat underestimate the tidal currents affected by narrow waterway and topography in inner-bay.

Keywords : South Sea, tidal elevation and tidal currents, numerical simulation, EFDC model

1. 서 론

우리나라의 산업화와 급속한 경제성장은 해양활동 및 산업발달을 가속화시키고 배타적 경제수역의 선포 등에 따라 해양환경보존, 해상교통, 연안재해, 군사작전수행, 국제해양질서 등의 다양한 해양관련 자료의 요구가 증대되고 있다. 그러나 우리나라 남해안을 포함하는 황·동중국해는 매년

늘어나는 항만 물동량에 의하여 선박의 항행이 빈번하지만 선박안전과 관련된 정보제공은 상대적으로 미흡한 실정이다. 정확한 조류 정보의 실시간 예측이 선행됨으로서 선박이나 인명피해 및 유류오염에 대한 신속한 대처로 인명구조나 환경오염의 저감을 위한 신속하고 체계적인 사고대처수립을 수행할 수 있다. 그러나 실제 현저한 조석현상이외에도 인접해역으로부터의 담수유입, 종관규모의 해면풍, 해

*해양수산부 국립해양조사원 (Corresponding Author: Seok Jae Kwon, Ocean Research Lab., National Oceanographic Research Institute, 1-17, 7Ga Hang-dong, Jung-gu, Incheon 400-800, Korea. sj79kwon@nori.go.kr)

** (주)지오시스템리서치(GeoSystem Research Corp., 1-40, Geumjung-dong, Gunpo 435-824, Korea)

류의 유입, 계절에 따른 해면의 가열·냉각 등과 같이 순환에 영향을 미치는 주요 물리인자들이 다양하게 존재하며 복합적으로 작용한다.

남해안은 많은 만과 200여개의 도서로 이루어져 있고 해안선의 길이는 약 8,416 km이며 해저경사는 제주해협(최심 120 m)과 대한해협(최심 228 m) 등의 골을 제외하고는 수심 100 m 내외로 대체로 평탄하다. 남·서해안에는 하천의 유입과 큰 조차 때문에 시주가 형성되고 있으며 만이나 도서로 가로막힌 해안에는 간석지가 발달하고 있다. 남해안의 해저경사는 평균적으로 1/40~1/60이며, 내만에서는 1/100~1/500의 완만한 경사를 이루고 있다(이석우, 2004). 특히, 목포항, 부산신항, 광양항 등의 인근 해역은 많은 수출입 해상물동량이 수송되는 해상교통로로 이용되고 있다. 남해는 반일주조가 우세한 혼합조류로서 약간의 일조부등은 있으나 규칙적인 1일 2회조가 나타난다.

연안이나 만 등에서의 세부역 위주의 수치모의는 제외하고 동해 및 황·동중국해와 관련된 광역에서의 해수순환을 위주로 수행한 국내 기존의 연구로서 최병호(1984)는 3차원 모델을 이용하여 황·동중국해를 대상으로 정상균일풍을 고려함으로써 수치모의를 수행하였다. 박용향과 김성일(1987)은 2차원 모델을 이용하여 제주도 주변의 조석 잔차류의 거동을 위한 수치모델 연구를 수행하였다. 신상익과 승영호(1993)는 3차원 해수유동 모형과 혼합효율개념을 이용하여 서해중부역에 조석전선을 모의하였고 승영호와 김균(1993)은 Cox 모델을 이용하여 동해의 순환에 열교환이 미치는 영향을 연구하였다. 그리고 강관수(1994)는 유사변환기법을 이용한 3차원 해수유동 수치모형에 관하여 연구하였으며 임근식과 김구(1995)는 동해를 대상으로 경계면 마찰과 해저지형을 고려하여 울릉 난수성 Eddy 등의 거동을 수치모의하였다. 이호진(1999)은 3차원 유한차분-Galerkin 함수 전개 모형을 황해 및 동중국해에 적용하여 해수순환을 연구하였다. 김철호와 윤정환(1999)은 GFDL MOM2를 이용하여 동해의 상층과 중층의 순환을 재현하였고 김국진 등(2001)은 POM을 이용한 동해의 모델결과와 MICOM을 이용한 모델결과를 서로 비교한 적이 있다. 그리고 이호진 등(2003)은 MOM의 변형모델인 RIAMOM과 MOM을 동일조건하에서 동해에 적용하여 서로 비교하였다. 전술한 황·동중국해 및 동해에 관한 국내의 기존연구 이외에도 여러 연구 및 사업들이 있으나 일반적으로 해양물리학적 및 지질학적 환경이 다른 점에 근거하여 대상해역을 동해 및 황·동중국해로 분리하여 수치모의를 수행하여 왔다. 그리고 조석현상 이외에도 인접하천으로부터의 담수유입, 해면풍, 해

류의 유입 등과 다양한 수치기법과 이론의 적용을 통해 동해 및 황·동중국해의 해수순환을 모의하여 왔음을 알 수 있다. 이와 같이 순환에 영향을 미치는 주요 물리인자들이 복합적으로 작용하지만, 본 연구에서는 전술한 조류정보 제공에 우선적으로 목적을 두고 가장 큰 영향을 미치는 조위 영향과 하천으로부터의 담수유입을 고려하여 첫 대상해역인 남해안의 조위 및 조류를 대상으로 수치모의를 수행하였다. 본 연구에서 외해개방경계조건을 위한 조위모의 결과의 비교는 최병호(2000)와 한국해양연구원(2003)을 활용하였다.

대용량, 고속처리용 컴퓨터의 발달 및 보급, 그리고 수치모형의 개발과 발전에 따라 광범위한 해역의 장기간의 다소 정확한 예측이 가능해졌으며, 그 속도 또한 빨라져 거의 실시간에 가까운 조위 및 조류의 예측을 수행할 수 있다. 현재 국립해양조사원 홈페이지를 통해 제공 중인 실시간 조위정보는 23개 검조소에서 제공되고 있으며, 조류정보는 여수해만 입구에서의 HF-Radar 자료가 있다. 그러나, 이러한 조위 및 조류정보는 단순 그림 또는 표 위주의 정보만을 제공하고 있어 사용자의 편의성 및 활용성에 제약이 있다. 그러므로 본 연구에서는 한반도와 주변해역을 중심으로 생산된 조위, 조류관측 및 예보자료를 디지털화하여 제공하는 서비스로 시·공간적으로 구체적인 숫자, 문자, 그래픽 형태로 다양하고 상세한 예측정보를 제공하는 새로운 개념의 정보제공 체계를 위해 우선 남해안을 대상으로 조위 및 조류 수치모의를 수행하였다. 본 연구에서는 결과는 향후 협수로 및 내만을 포함하는 상세 연안역 해수유동 모델의 경계조건으로 활용할 예정이다. 본 연구는 해양사고의 증가와 그에 따른 인명피해, 환경오염을 저감하고 신속히 대처할 수 있는 정보를 제공함과 동시에 운항선박의 경제적 항행을 지원하기 위하여 실시간 조위 및 조류예측 정보를 위한 수치조류도 제공을 목적으로 한다. 향후 이러한 조위 및 조류정보 제공시스템은 지리정보시스템(GIS)을 기반으로 다양한 표출기능을 구현하여 향후 실시간 조위 관측자료 및 조위예보자료, 기상관측자료 등을 포함하는 연안해양 유비쿼터스 시대의 통합정보제공시스템의 기반이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 서측으로는 대흑산도, 동측으로는 포항, 남측으로는 제주도 북단을 포함하는 남해안 대상영역(Fig. 1)의 조위 및 조류 수치모의를 위한 외해 개방경계 조건을 위해 인공위성 TOPEX/POSEIDON의 조석보정용 모델결과를 활용하였고 조간대의 고려가 가능한 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)모형을 이용하여 2.0 km의 정격자망

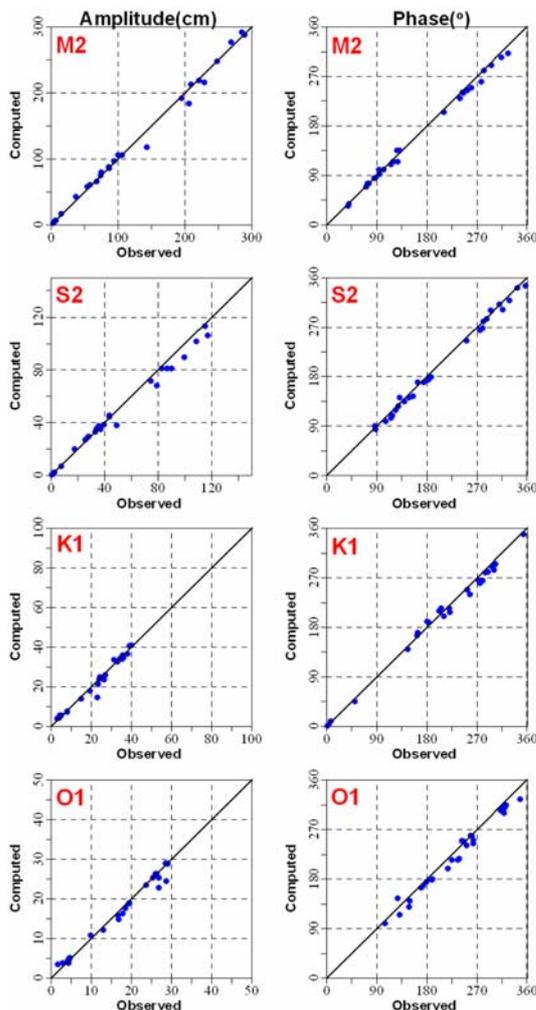


Fig. 2. Comparison between the computed results and observed results.

월 1일 ~ 2003년 12월 31일의 1년간의 자료를 조석조화분해한 결과를 이용하였다. 조위관측 자료의 조석조화분해에는 영국의 POL/PSMSL에서 개발한 조석조화분해 프로그램인 TASK2000 package를 이용하였다. TASK2000은 국내·외 주요 대학, 연구소 및 기업체에서 조석조화분해에 범용적으로 사용하고 있는 프로그램이다.

Fig. 2의 M_2 분조를 비교한 그림을 살펴보면, 100 cm 이하 부분은 남해안 지역(포항, 울산, 부산, 여수, 목포 등)의 자료이며, 100 cm 이상의 자료는 서해안 지역(영광, 군산, 대산, 안산, 인천 등)의 자료이다. 서해안 자료의 경우에는 M_2 분조의 반조차에 있어서 약간의 오차를 보이고 있으나, 남해안의 경우에는 상당히 정확한 일치를 보이고 있어 남해

안 수치모델링 구축의 외해경계자료로 적용 가능한 것으로 판단된다. Fig. 2에서 모델값과 관측치가 일부 차이를 보이는 것은 서해안의 조위관측소가 복잡한 도서 및 수로 내측에 위치하고 있는 것에 비해 NAO.99Jb 모델의 격자크기($1/12^\circ$)가 이를 적절하게 재현하지 못하여 조석과의 전파가 원활하지 않기 때문으로 보이며, 이는 보다 작은 격자를 이용함으로써 개선이 가능할 것으로 판단된다.

3. 조위 및 조류 수치모형

지금까지 개발된 해양순환 수치모델들을 크게 2가지로 유한차분법(Finite Difference Method)과 유한요소법(Finite Element Method)으로 나눌 수 있고 유한차분법은 직교격자를 사용하는데 반해 유한요소법은 삼각격자를 사용한다. 또 다른 수치모델의 구분으로 연직좌표계의 사용을 들 수 있다. 연직좌표계는 z -좌표, σ -좌표(bottom following coordinate), 등밀도-좌표(isopycnal coordinate) 등으로 구분 가능하다. 이는 각 연직좌표가 해저지형과 해황특성에 따라 재현 정도에 한계성을 갖고 있어 최근에는 미국해군연구소에서 두 가지 이상의 수직좌표축을 사용하는 혼합(Hybrid)모델도 개발 중에 있고, 실제 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)은 MICOM(Miami Isopycnal Coordinate Ocean Model)을 확장하여 기존의 z -좌표, σ -좌표, 등밀도-좌표의 3가지 형태의 수직 좌표계를 혼합한 모델이다. 그러나 Oey(2006)는 혼합좌표계에 있어 사용되는 수치기법의 개선이 필요하다고 제안한 바가 있다.

연구 대상해역인 남해안은 조간대가 발달해 있어 수치모델링 시 조간대의 고려가 필수적이다. 그리고 급변하는 해저지형의 경우 σ -수직좌표계만을 사용하기에는 수심에 의한 모델의 불안정성을 제거하기 위해 어느 정도의 수심을 평활화하여야 하는 한계가 있다. 그러나 남해안의 해저경사는 대체적으로 완만하여 수심의 평활화가 필요하지 않다. 본 연구에서는 조간대를 고려할 수 있고 σ -좌표계를 사용하는 EFDC 모형을 남해안에 적용하는 것으로 하였다.

3.1 수치모형의 개요

EFDC모형은 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의하는 3차원 수치모델로서 미국 Virginia Institute of Marine Science에서 개발되었으며, 미국 환경청(Environmental Protection Agency)의 공인 모델로 지정되어 있다. 수평적으로 직교 혹은 곡면(Cartesian or curvilinear) 좌표계를 사용하며 Arakawa C-grid로 구성되어 있고 수직

적으로는 σ -좌표계를 사용한다. 그리고 Galperin et al.(1998)에 의해 수정된 Mellor-Yamada level 2.5 난류모델(Mellor and Yamada, 1982)을 사용하여 수직혼합을 계산한다. 질량 보존방범을 이용하여 조건대 처리가 가능하고 와동점성계수는 Smagorinsky(1963)의 식을 이용하여 매시간 계산한다. 시공간적으로 second order의 높은 정확성을 얻기 위하여 수치적 확산 에러를 최소화할 수 있는 multi-dimensional positive definite advection transport algorithm(Smolarkiewicz and Clark, 1986)을 사용하는 것으로 알려져 있다. 내부와 외부모드를 분리하여 계산하는 모드분리기법을 적용하여 계산시간을 단축하고 HEM-3D(a 3-Dimensional Hydrodynamic Eutrophication Model)와 연계도 가능하다.

EFDC 모델은 현재까지 수 많은 수역의 연구에 적용되어 왔다. 대표적인 수역학적 연구로는 미국 버지니아주의 James and York Rivers에서 담수 유입으로 인한 희석 효과, shellfish larvae 이동에 관한 연구(Hamrick, 1992, 1994a; Hamrick et al., 1995), 미국 플로리다주 Indian Lagoon과 Sebastian River에서 염수 침입에 대한 연구, 미국 Everglades에서의 대규모 습지 모의에 관한 연구(Hamrick, 1994b), 미국 플로리다주 Okeechobee 호에서 수온 모의에 관한 연구(Hamrick, 1996) 등에 적용한 바 있으며, 한국에서는 시화호(지오시스템리서치(주), 2002), 경기만(지오시스템리서치(주), 2004) 등에 대해 적용된 바가 있다.

3.2 기본방정식

EFDC 모델은 연속방정식과 운동방정식, 열염 보존방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식들로 구성되어 있으며, 열염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. 유체정력학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하면 수직 적분된 기본방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

연속방정식

$$\frac{\partial m\zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hv) + \frac{\partial}{\partial z}(mw) = 0 \quad (1)$$

운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial mHu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huu) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvu) + \frac{\partial}{\partial z}(mwu) \\ - \left(mf + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) Hv = -m_y H \frac{\partial}{\partial x} (g\zeta + p) \end{aligned}$$

$$-m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial mHv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huv) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvv) + \frac{\partial}{\partial z}(mwv) \\ + \left(mf + v \frac{\partial}{\partial x} m_y - u \frac{\partial}{\partial y} m_x \right) Hu = -m_x H \frac{\partial}{\partial y} (g\zeta + p) \\ - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (4)$$

물질보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial mHS}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuS) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvS) + \frac{\partial}{\partial z}(mwS) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \\ \frac{\partial mHT}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuT) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvT) + \frac{\partial}{\partial z}(mwT) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \\ \frac{\partial mHC}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(m_y HuC) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x HvC) + \frac{\partial}{\partial z}(mwC) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(mH^{-1} A_b \frac{\partial C}{\partial z} + \omega C \right) + mHR_c + Q_C \quad (5) \end{aligned}$$

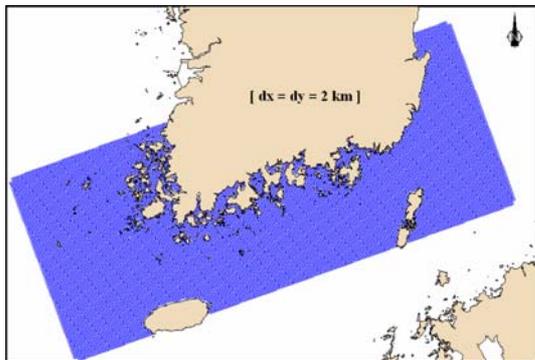
여기서,

- h, ζ : 기준면 하 수심(m) 및 기준면 상 수위(m)
- u, v : 직교하는 곡선좌표계 x, y 에서의 수평유속(m/s)
- m_x, m_y : 곡선좌표계 임의거리 $ds^2 = m_x^2 dx^2 + m_y^2 dy^2$ 을 만족시키는 metric tensor의 대각성분의 제곱근 ($m = m_x m_y$) (m)
- w : 변환된 무차원 연직좌표계 z 에서의 수직유속 (m/s) 성분
- H : 총수심 (=h+) (m)
- p : 압력, 수심 z 에서 기준수압($\rho_0 gH(1-z)$)과의 차를 ρ_0 로 나눈 값
- f : Coriolis parameter
- A_v : 수직 난류 점성계수(m²/s)
- A_b : 수직 난류 확산계수(m²/s)
- Q_u, Q_v : 운동량 source-sink 항(kg m/s)
- ρ : 밀도(kg/m³)
- T, S : 수온(°C)과 염분(psu)

- b : 부력(m/s^2)
- Q_T, Q_S : 수온($^{\circ}C$) 및 염분(psu)의 source-sink 항
- ω : 침강속도(m/s)
- R_c, Q_c : 생화학적 source-sink 항 및 외부 source-sink 항

3.3 모형의 격자체계 및 수심도

남해연안 수치모델의 계산영역은 대흑산도에서 포항에 이르는 영역으로, 동서방향의 길이는 약 490 km, 남북방향 길이는 약 210 km이다. 모델 격자망은 영역 전체를 2 km의 직교 정격자를 사용한 것과 0.5~2.0 km의 가변직교격자를 사용한 두 개의 격자망을 구축하였으며, 각 격자망을 Fig. 3에 제시하였다. 가변격자망에서 최소 격자크기가 0.5 km인 영역은 목포해역에서 부산 인근해역까지이다. 2 km 격자망은 남해전역 수치조류도 제작을 위하여 구축하였으며, 0.5~2.0 km 격자망은 항만조류도 제작시 외해경계자료 추출을 위함이다. 특히, 0.5 km로 구성된 격자 영역의 결과는 남해를 몇 개의 권역(거덕도~진해만, 광양만~여자만, 득량만 일대, 목포 주변해역 등)으로 구분하여 보다 자세한 조석조화



(a) Grid size of 2km

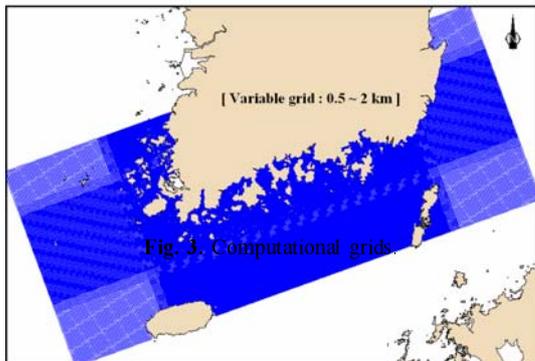


Fig. 3. Computational grids.

(b) Variable grid size of 0.5~2.0 km

Fig. 3. Computational grids.

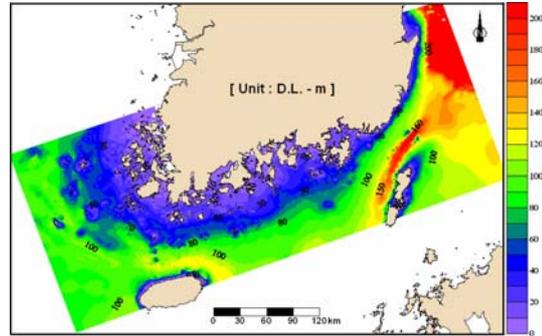


Fig. 4. Bathymetry of the South Sea.

상수를 추출하고자 하였다. 2 km 격자망은 가로 264개 × 세로 114개의 격자로 구성되어 있으며, 유효 계산격자는 19,806개이다. 0.5~2.0 km 가변격자망은 가로 733개 × 세로 274개의 격자로 구성되어 있으며, 유효계산 격자수는 108,404개 이다. 수직층은 두 격자망 모두 σ 좌표계를 이용하여 5개층으로 구성하였으며, 각 층의 두께는 표층에서 저층으로 각각 총 수심에 대하여 10%, 20%, 40%, 20%, 10%로 설정하였다.

국립해양조사원의 22개의 최신 수치해도를 이용하여 해안선을 추출하고, 수심자료를 이용하여 모델 격자수심을 생성했으며, 생성된 해안선과 모델 격자수심은 Fig. 4와 같다.

3.4 물리적 계수 및 하천유량

수평 난류점성항 및 난류 확산항을 통해 모델격자보다 작은 규모의 난류 혼합을 표현한다. 수평 난류 점성계수는 격자 크기와 유속 경사에 의해 결정되는 Smagorinsky식(Smagorinsky, 1963)을 통해 다음과 같이 계산되며, 일반적으로 수평 난류 점성계수와 수평 난류 확산계수는 같다고 본다. 수평 난류 점성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$A_M = C\Delta x\Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

여기서, 상수 C 는 0.10~0.30의 값이 사용되며, 격자가 충분히 작은 경우 무시될 수 있다(Oey et al., 1985a,b). Smagorinsky 식에서는 격자 크기가 작아질수록 그리고 유속 경사가 작을수록 수평 난류점성계수가 감소한다. 본 연구에서는 민감도 분석을 통하여 상수 C 값을 0.2로 지정하여 실험을 수행하였다.

모델영역 내부로 전파되는 유동을 재현하기 위하여 외해 개방경계에서 조위 또는 법선 방향 유속 성분이 지정되어

야 한다. 그리고 개방경계의 접선방향 유속 성분은 0으로 지정된다. 유동이 모델영역 외부로 전파될 때는 개방경계면에 직각인 속도 성분을 운동방정식에서 이류항과 수평 와동항을 무시한 나머지 항들만으로 계산한다. 육지에 직각 방향인 유속 성분은 없다고 가정한다.

저면 전단응력은 다음과 같이 계산된다.

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_b \sqrt{u^2 + v^2} (u, v) \quad (7)$$

여기서,

- τ_{bx}, τ_{by} : x, y 방향의 저면 전단응력(kg/m²)
- c_b : 저면 마찰계수
- u, v : 저면에서의 x, y방향 유속(m/s)

본 연구에서의 하천유량은 한국하천일람(건설교통부, 2005)과 수자원장기종합계획 보완(안)(건설교통부, 2006)에 근거하여 낙동강은 497.8 m³/s, 그리고 섬진강은 130.0 m³/s의 유량조건을 이용하였다.

3.5 수치기법

이 모델은 staggered grid에 속하는 Arakawa C grid를 사용하며, 동쪽으로 갈수록 x가, 북쪽으로 갈수록 y가, 수직 위쪽으로 갈수록 z가 증가하는 좌표계를 사용한다. 기본방정식의 수치해법은 유한차분법과 질량 및 부피 보존을 위한 유한체적법을 사용하며, 수심, 잉여압력, 해저면 경사의 차분화시 2차 정확도를 갖는 중앙차분법(centered differencing)을 사용한다. 운동방정식에서 Coriolis force항과 curvature항은 2차 정확도를 갖는 에너지 보존 기법(Arakawa and Lamb, 1977)을 사용한다. 빠르게 전파되는 외부 중력파를 모의하는 외부 모드(external mode) 계산시 수평 방향으로, 수직적 구조를 모의하는 내부 모드(internal mode) 계산시 수직 방향으로 음해법을 적용하므로 계산 효율이 높다.

질량보존방정식의 이류항을 전방차분법(upwind differencing)으로 해석하면 안정적인 결과를 주고 음의 농도를 발생시키지 않는 장점이 있으나, 수치적 확산이 과도하게 발생하며 공간적으로 1차의 낮은 정확도를 갖는 단점이 있다. 반면에 중앙차분법으로 해석하는 경우에는 2차의 정확도를 가지지만, 농도 경사가 큰 해역에서 불안정한 결과를 나타내어 음의 농도가 발생할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 이 모델에서는 해의 정확도를 높이고 음의 농도가 발생하지 않는 Multi-dimensional Positive Definite Advection Transport Algorithm(MPDATA, Smolarkiewicz and Clark, 1986)를 사용한다. MPDATA 기법은 1차의 정확도를 갖는 전방차분

법을 사용하는 첫 번째 step과 수치적 확산을 줄이기 위한 두 번째 step으로 구성되어 있으므로, 시·공간에 대해서는 적어도 2차의 정확도를 가지며, 시간에 대하여 최대 3차, 공간에 대해서는 최대 5차의 정확도까지 가질 수 있다.

4. 남해의 조위 및 조류 재현

4.1 수치모형의 실험조건

계산 초기에는 전 계산영역의 조위와 유속을 '0'으로 하는 cold start로 설정하였으며, hot start 시를 고려하여 일정 시간 경과시 현재와 과거 직전 시간스텝의 주요 변수정보를 별도로 저장하였다. 이때 조위는 평균해면(Mean Sea Level, MSL) 기준이다. 외해 개방 경계조건은 앞서 설명한 NAO.99Jb 모델에서 산출된 16개 분조를 개방 경계조건으로 설정하였다. 본 연구에서 바람조건은 모델에 고려되지 않았다. 모델 계산 기간은 각 격자에서의 조위 및 조류의 시계열 자료를 통하여 모델에서 고려한 16개 분조의 조화 분해가 가능하도록 초기안정화 기간 3일을 제외한 60일을 수행하였다. 계산 시간간격은 CFL조건을 만족하도록 2 km 격자망에 대해서는 30초, 0.5~2.0 km 격자망에서는 12초로 설정하였다.

4.2 조위 및 조류의 검증

조위 및 조류에 대한 검증은 모델영역내에 위치하고 있는 국립해양조사원 조위관측소 14개 지점의 1년 자료와 국립해양조사원 및 기타 국·내외에서 30주야 이상 연속관측된 조류자료를 이용하여 각각 검증을 실시하였으며, 검증에 사용된 자료는 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 5에서 ○로 표시된 부분이 외해역 자료이며, 조류의 검증은 내해역과 외해역으로 구분하여 실시하였다.

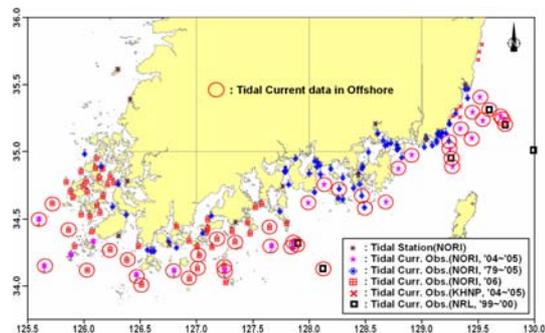


Fig. 5. Data used for model verification.

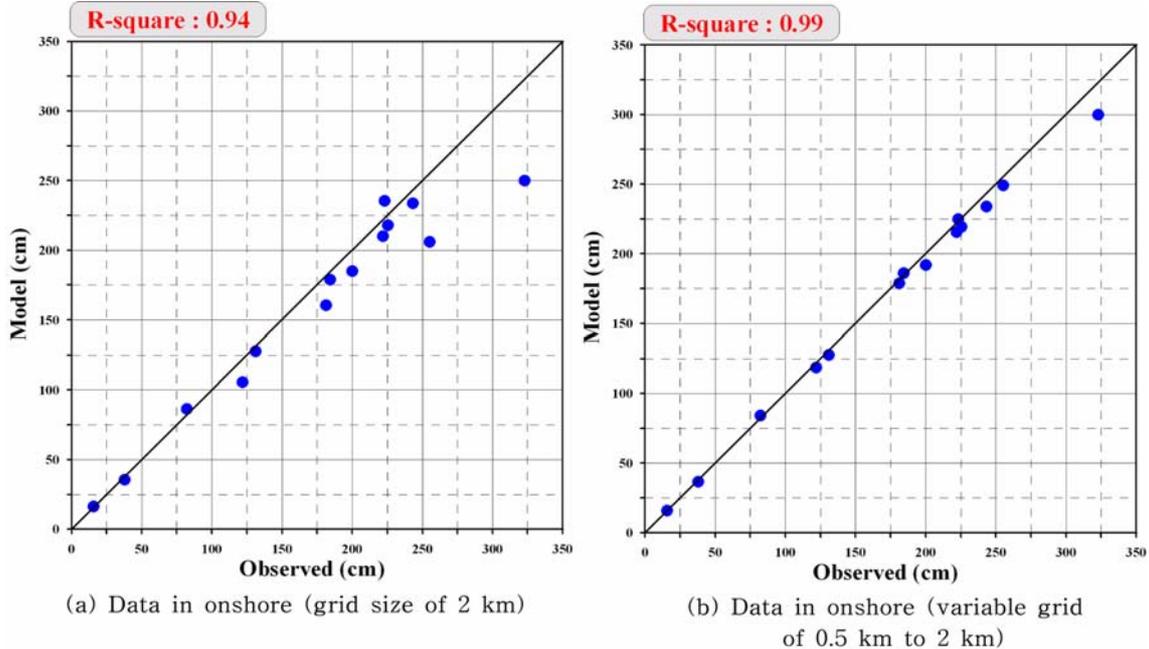


Fig. 6. Tidal verification.

조위에 대한 검증결과 R-square값은 2 km 격자에서는 0.94, 0.5~2.0 km 격자에서는 0.99로 산정되어 내해측을 0.5 km로 해상한 격자망에서 0.9 이상의 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 6). 0.5~2.0 km 격자에 대한 조위 검증결과에서 목포 검조소를 제외한 다른 해역에서는 관측값과 예측값이 잘 일치하였다. 목포 검조소의 경우 관측값과 예측값의 오차가 2 km 격자의 경우 약 50 cm에 달하며, 0.5 km 격자의 경우 약 20 cm로 감소하였다. 이는 목포 검조소가 내만에 위치하고 주변해역에는 크고 작은 섬들이 산재해 있어 2 km의 격자가 목포주변 지역의 지형상향과 내만의 좁은 협수로를 제대로 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다. 조류에 대한 검증은 내해역과 외해역에서 관측된 자료로 구분하여 각 격자망에 대한 R-square값을 산정하였다. 내해역 자료에서 2 km로 해상한 격자망과 0.5 km로 해상한 격자망에 대하여 R-square값은 각각 0.36과 0.60으로 산정되어 0.5 km로 해상하는 것으로 상대적으로 상관도가 높게 나타나 전반적으로 0.5 km의 격자크기로는 내만의 주요 협수로 및 지형의 영향을 크게 받는 조류를 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 외해역 자료에서 2 km와 0.5~2.0 km 격자에 대한 R-square값은 각각 0.88과 0.94로 산정되어 외해역 자료의 경우 2 km 격자라도 어느 정도 만족할 만한 조류의 재현이 가능하지만 0.5 km로

격자를 작게 할수록 정확도는 향상되는 것으로 나타났다. 내해역과 외해역자료에 대한 조류 검증 결과를 Fig. 7에 제시하였다.

4.3 조위 및 조류 모의결과

실시간 조류예측에 필요한 16개 분조의 반조차와 지각 중 주요 4개분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 대한 반조차와 위상을 Fig. 8에 제시하였다. M_2 분조의 경우 남해안 동측에서 서측으로 갈수록 반조차가 증가하는 것을 보여주고 있다. 그 크기는 울산부근에서 약 10~15 cm, 거제도 남단에서 50~60 cm, 그리고 진도 남단에서 95~100 cm 정도의 반조차 분포를 보였다. 그리고 위상을 살펴보면 조석의 전파가 남해안 동측에서 남해안 서측으로 전파하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 모델제현기간 동안 각 격자점에서 나타난 유속중 최강유속을 추출하여 나타낸 분포도이다. 최강유속 분포에서 0.5~2.0 km의 가변격자를 사용한 경우 내만의 넓은 수로와 외해 영역에서는 조류모의결과와 관측결과가 대체적으로 일치하는 경향을 보였다. 그러나 진도수도, 부산신항, 광양항, 목포항, 진해만, 사천만, 강진만 등의 내 0.3~0.8 km에 이르는 일부 협수로부터 조류모의결과가 관측결과를 다소 과소평가하는 경향이 나타났다. 본 연구에서 드러난 내만의 주요 협수로 및 지형의 영향을 받는 조류제현의 한계성을 극복하기 위

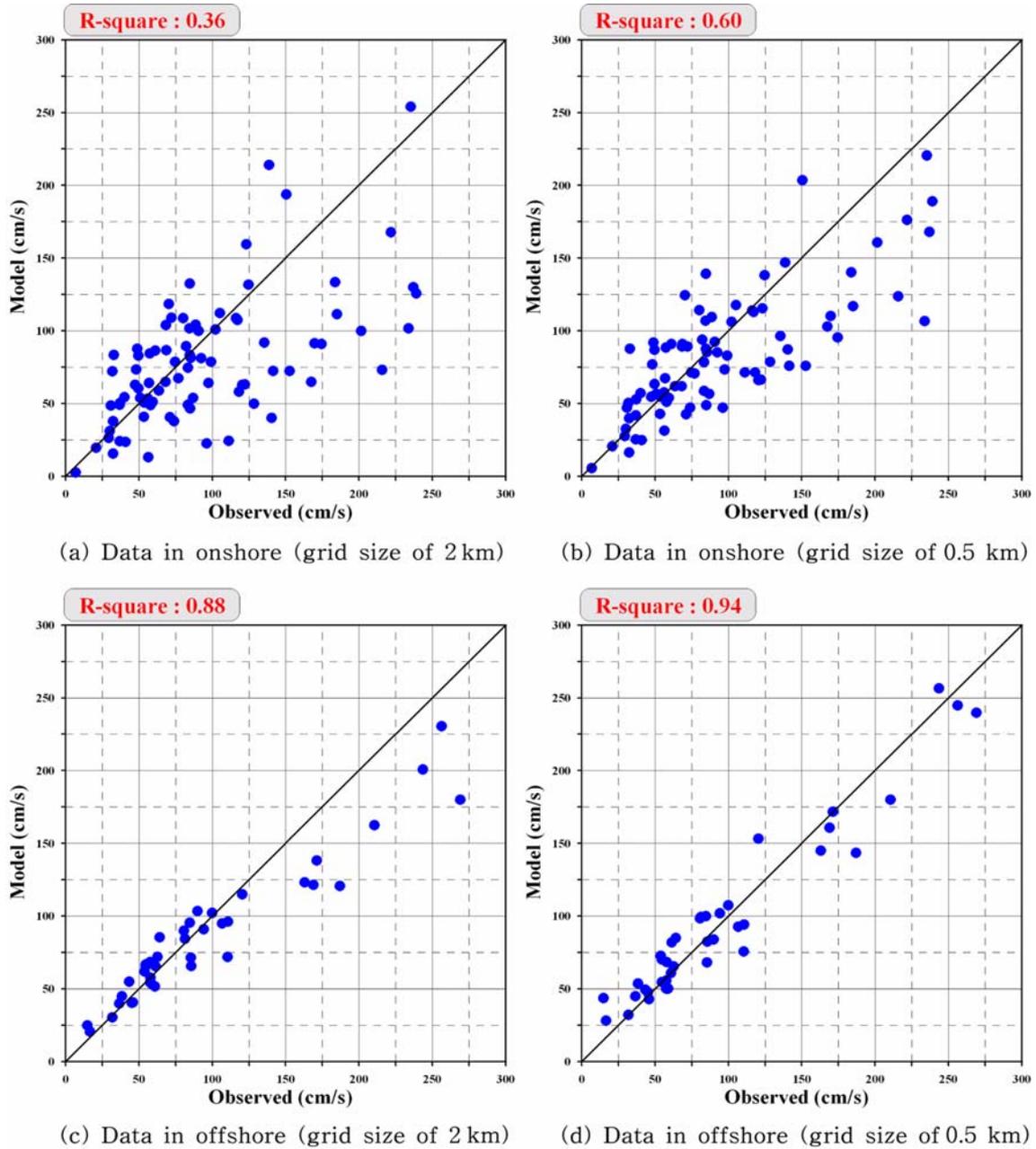


Fig. 7. Verification of tidal currents.

해 추가적으로 주요협수로가 위치한 만 등을 따로 분리한 세부역에서 세밀한 격자망 및 정밀수심을 고려함으로써 조위 및 조류를 수치모의 할 필요가 있고 향후 수행할 예정이다. 각 분조의 조화상수(반조차, 위상)를 이용하여 2007년 1월 1일 3시에서 2007년 1월 1일 12시까지

지 3시간 간격 조류예측 결과를 Fig. 10에 제시하였다. 기존 조위, 조류 관측자료를 이용하여 수치모델을 통하여 모델 각 격자에서의 조석 및 조류조화상수값을 획득함으로써 조위 및 조류에 대한 실시간 예측이 가능하다고 볼 수 있다.

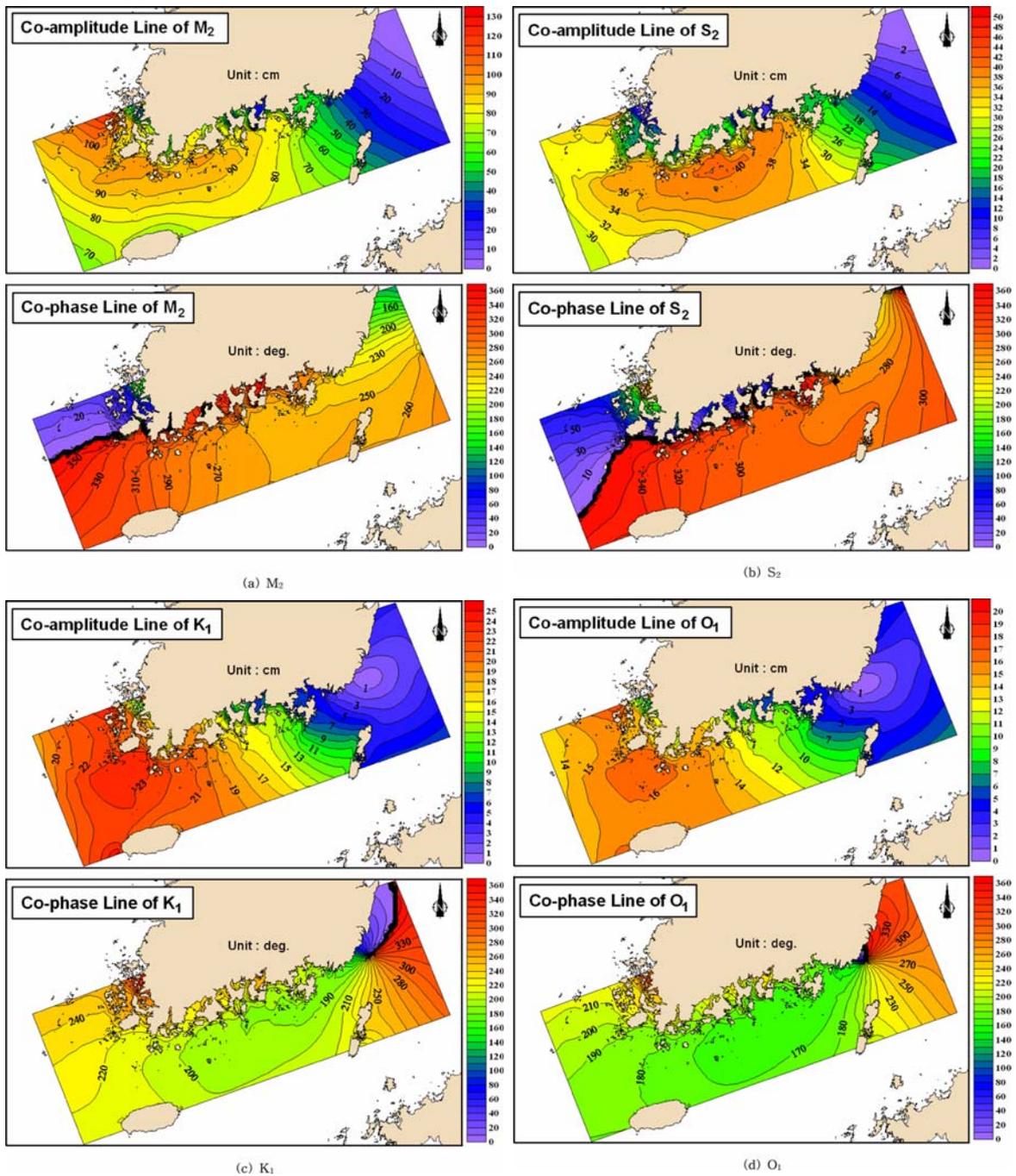


Fig. 8. Computed tidal charts in the study area.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 남해안 대상영역의 조위 및 조류 수치모의를 위한 외해 개방경계 조건을 위해 인공위성 TOPEX/

POSEIDON의 조석 보정용 모델로 개발된 6개중 상대적으로 오차율이 가장 낮고 16개 분조에 대한 조석조화상수값을 고려하는 NAO.99Jb 모델결과를 활용하였으며 기존연구결과와 비교한 결과, 주요 4개 분조들에 대해서 무조점의

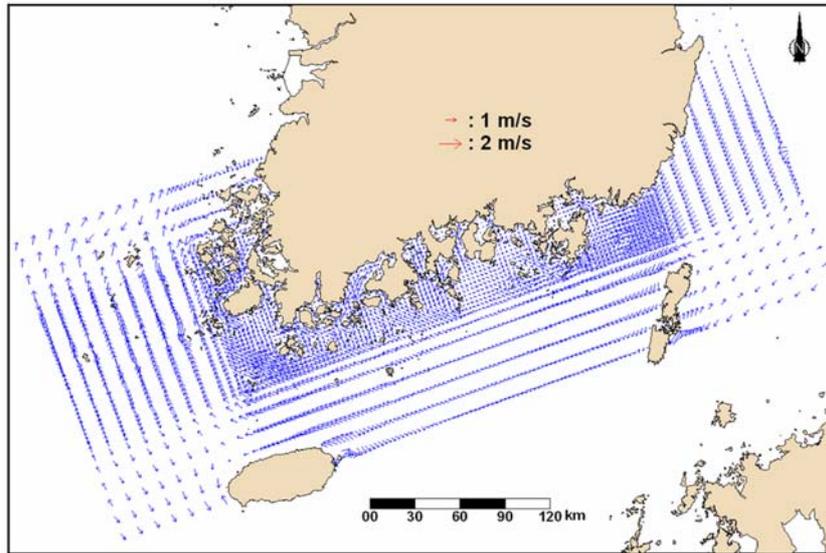


Fig. 9. Computed high tide level distribution.

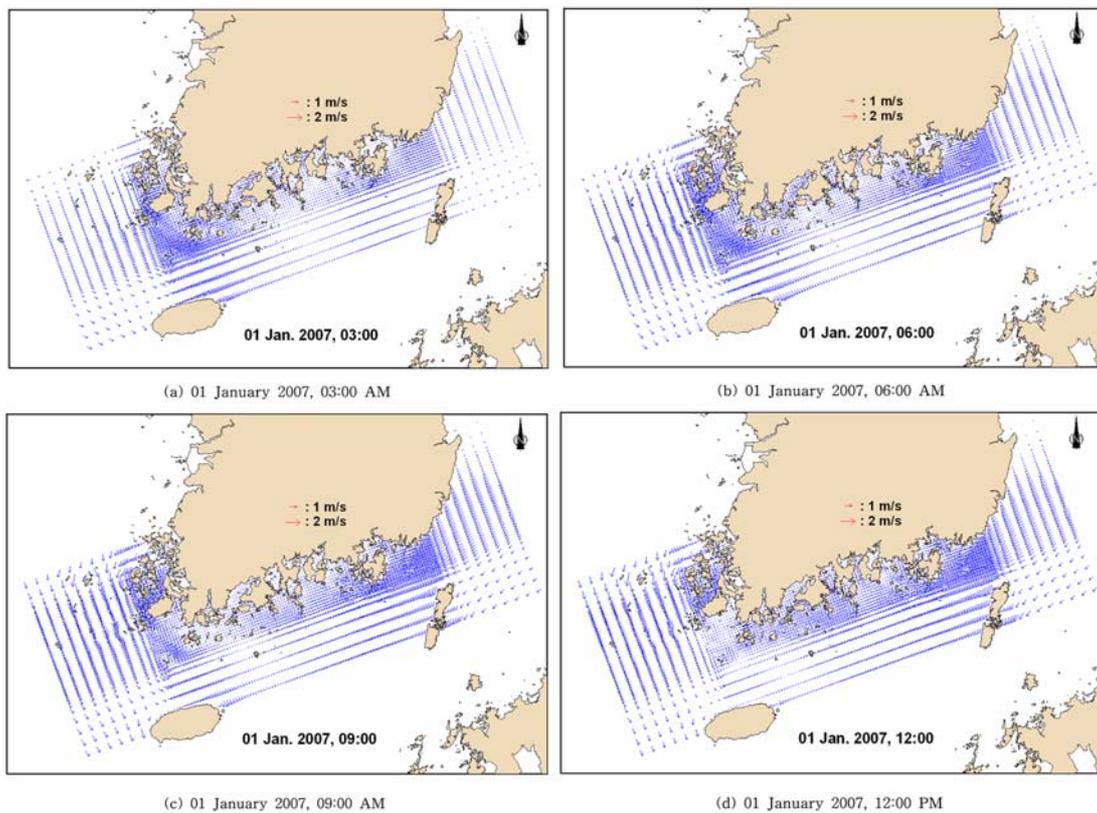


Fig. 10. Computed maximum flood currents in surface layer.

위치는 거의 유사하나, 외해에서의 조치는 모두 서로 간에 다소 차이를 보였다. 이 활용결과와 국립해양조사원 조위

관측소의 자료와 비교한 결과 서해안의 경우, M_2 분조의 반 조차에 있어서 약간의 오차를 보이고 있으나, 남해안의 경

우에는 상당히 정확한 일치를 보이고 있어 남해안 수치모델링 구축의 외해경계자료로 적용하였다.

조간대를 고려할 수 있고 σ -좌표계를 사용하는 EFDC 모형을 남해안에 적용하였고 남해연안 계산영역에서 모델 격자망은 영역 전체를 2 km의 직교 정격자를 사용한 것과 0.5~2.0 km의 가변직교격자를 사용한 두 개의 격자망을 구축하여 결과를 서로 비교하였다. 조위에 대한 검증결과 R-square값은 0.5~2.0 km 격자에서 상대적으로 더 높게 산정되었고 내해측을 0.5 km로 해상한 격자망에서 0.9 이상의 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 조위 검증결과에서 내만에 위치하고 주변해역에 크고 작은 섬들이 산재해 있는 목포 조위관측소를 제외한 다른 관측소에서는 관측값과 예측값이 잘 일치하였다. M₂ 분조의 경우 남해안 동측에서 서측으로 갈수록 반조차가 증가하였으며 위상으로 부터 남해안 동측에서 남해안 서측으로 조석의 전파가 이루어짐을 알 수 있었다. 조류에 대한 검증에서는 0.5 km로 해상한 영역에서 R-square값이 0.6으로써 상대적으로 상관도가 높게 나타났으나 전반적으로 0.5 km의 격자크기로는 내만의 주요 협수로 및 지형의 영향을 크게 받는 조류를 잘 재현하지 못하는 반면 외해역 자료의 경우에는 2 km 격자라도 어느 정도 만족할 만한 조류의 재현이 가능하였다. 최강유속 분포에서 0.5~2.0 km의 가변격자를 사용한 경우 내만의 넓은 수로와 외해 영역에서는 조류모의결과와 관측결과가 대체적으로 일치하는 반면에 진도수도, 부산신항, 광양항, 목포항, 진해만, 사천만, 강진만 등의 내 0.3~0.8 km에 이르는 일부 협수로 등에서는 조류모의결과가 관측결과를 과소평가하는 경향이 나타났다. 본 연구에서 드러난 내만의 주요 협수로 및 지형의 영향을 받는 조류재현의 한계성을 극복하기 위해 향후 추가적으로 주요 협수로가 위치한 만 등을 따로 분리하여 세밀한 격자망 및 정밀수심을 고려한 조위 및 조류 수치모의가 필요하다. 그러므로 협수로 및 내만을 위한 상세 연안역 해수유동 모델의 경계조건을 추출하기 위한 목적으로 본 연구의 결과를 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 환경오염을 저감하고 운항선박의 경제적 항행을 지원하기 위한 실시간 조위 및 조류예측 정보를 수치조류도를 이용하여 제공하고자 하였다. 현저한 조석현상과 인접하천으로부터의 담수유입을 고려하였으나 실제로는 이외에도 중규모의 해면풍, 해류의 유입, 계절에 따른 해면의 가열·냉각 등과 같이 순환에 영향을 미치는 다양한 주요물리인자들이 복합적으로 작용하고 있으므로 대기모델과의 접합필요성이 제기되고 있다. 또한 수심이 얇은 연안역

에서의 바닥마찰에 대해 부분적으로 해저마찰계수를 적용하는 개선작업이 필요할 수 있다(최병호와 홍성진, 2005; 서승원과 이화영, 2007). 본 연구에서 드러난 내만의 주요 협수로 및 지형의 영향을 받는 조류재현의 한계성을 극복하기 위해 향후 추가적으로 주요협수로가 위치한 만 등을 따로 분리한 세부역에서 작은 격자망 및 정밀수심을 고려함으로써 조위 및 조류를 위한 수치모의를 수행할 예정이고 전술한 해면풍과 해류의 고려를 검토할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국립해양조사원 수치조류도 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 본 연구의 검증에 사용된 자료를 위한 기존관측에 참여하셨던 국립해양조사원의 정우진, 유학렬, 부지훈 님을 비롯한 관련 분들의 노고에 감사드립니다.

참고문헌

- 강관수 (1994). 유사변환기법을 이용한 3차원 해수유동 수치모형. 박사학위논문, 서울대학교.
- 건설교통부 (2006). 수자원장기종합계획 보완(안).
- 박용향, 김성일 (1987). 제주도 주변의 조석 잔차류에 대한 수치모형 연구. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, 22(1), 9-18.
- 서승원, 이화영 (2007). 병렬 클러스터 시스템 구축 및 유한요소모형을 이용한 황해 조석재현. *한국해양·해양공학 회지*, 19(1), 1-15.
- 승영호, 김균 (1993). 동해 순환의 수치모형. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, 28(4), 292-304.
- 신상의, 승영호 (1993). 혼합율 개념을 이용한 서해 중부 조석전선의 수치모형. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, 28(2), 121-131.
- 이석우 (2004). 해양정보 130가지. 집문당, 대한민국.
- 이호진 (1999). 3차원 유한차분-Galerkin 함수 전개 모형을 이용한 황해 및 동중국해의 해수순환 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 임근식, 김구 (1995). 울릉 난수성 Eddy와 해저지형과의 상호작용에 관한 수치모형 연구. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 30(6), 565-583.
- 지오시스템리서치(주) (2002). 시화멀티테크노밸리 제5공구 조성공사 터키설계를 위한 수치모형 실험 및 해양조사, (주)대우건설.
- 지오시스템리서치(주) (2004). 송도 신도시 6.8공구 공유수면 매립 실시설계 용역중 해양조사 및 수치모형실험,

- (주)대영엔지니어링/(주)한구엔지니어링.
- 최병호 (1984). 3차원 수치모형을 이용한 동지나해의 정상균일 풍의 응력에 의한 해류의 산정. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, 19(1), 36-43.
- 최병호 (2000). 연안재해 대응기술 개발. 과학기술처.
- 최병호, 홍성진 (2005). 등지형 동적결합 조석 모형을 이용한 황해 및 동중국해의 조석모형. *한국해양-해양공학회지*, 17(4), 243-258.
- 건설교통부 (2005). 한국하천일람.
- 한국해양연구원 (2003). 대규모 연안개발에 따른 조위예측 연구개발. 보고서.
- American Geophysical Union (1999). American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, California, December 13-17.
- Arakawa, A. and Lamb, V.R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 174-265.
- Galperin, B., Kantha, L.H., Hassid, S. and Rosati, A. (1988). A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *J. of Atmos. Sci.*, 45, 55-62.
- Hamrick, J.M. (1992). A three dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. Special Report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Hamrick, J.M. (1994a). Evaluation of island creation alternatives in the Hampton Flats of the James River. A report to the US Army Corps of Engineers, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Hamrick, J.M. (1994b). Application of the EFDC (Environmental Fluid Dynamic Computer code) to SFWMD Water Conservation Area 2A. A report to South Florida Water Management District. JMH-SFWMD-94-01, Consulting Engineer, Williamsburg, VA.
- Hamrick, J.M., Kuo, A.Y. and Shen, J. (1995). Mixing and dilution of the Surrey Nuclear Power Plant cooling water discharge into the James River. A report to Virginia Power Company, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Hamrick, J.M. (1996). Application of the EFDC hydrodynamic model to Lake Okeechobee. A report to South Florida Water Management District, JMH-SFWMD-96-2. J.M. Hamrick, Consulting Engineer, Williamsburg, VA.
- Hamrick, J.M. (1996). User manual for the environmental fluid dynamics compute code, Special Report, The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, VA.
- Kim, C.H. and Yoon, J.H., (1999). A numerical modelling of the upper and the intermediate layer circulation in the East Sea. *Journal of Oceanography*, 55(2), 327-345.
- Kim, K.J., Seung, Y.H. and Suk, M.S. (2001). POM/MICOM inter comparison in modelling the East Sea circulation. *Ocean and Polar Research*, 23(2), 161-172.
- Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, 56(5), 567-581.
- Lee, H.J., Yoon, J.H., Kawamura, H., Kang, H.W. (2003). Comparison of RIAMOM and MOM in Modelling the East Sea/Japan Sea Circulation. *Ocean and Polar Research*, 25(3), 287-302.
- Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875.
- Oey, L.Y., Mellor, G.L. and Hires, R.I. (1985). A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part I: Description of the model and model simulations. *J. Physical Oceanography*, 15, 1676-1692.
- Oey, L.Y., Mellor, G.L. and Hires, R.I. (1985). A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part II: Comparison with observation. *J. Physical Oceanography*, 15, 1693-1709.
- Oey, L.Y. (2006). An OGCM with movable land-sea boundaries. *Ocean Modelling*, 13, 176-195.
- Smolarkiewicz, P.K. and Clark, T.L. (1986). The multidimensional positive definite advection transport algorithm: Further development and applications. *Journal of Computational Physics*, 67(2), 396-438.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.*, 91, 99-164.

Received May 14, 2007

Accepted June 11, 2007