

NEMO 모델을 이용한 지역 폭풍해일예측시스템 개발 및 검증 Development and Verification of NEMO based Regional Storm Surge Forecasting System

라나리* · 안병웅** · 강기룡*** · 장필훈****

Nary La*, Byoung Woong An**, KiRyong Kang*** and Pil-Hun Chang****

요지 : 본 연구에서는 한반도 중심 해역을 포함하는 북서태평양 영역에서의 폭풍해일 예측을 위해 NEMO(Nucleus for European Modelling of the Ocean) 모델을 이용하여 지역규모의 폭풍해일 예측시스템을 구축하였다. 이 시스템은 조석과 해일 예측으로 구성되어 있으며보다 정확한 폭풍해일을 예측하기 위해 수심자료와 대기-해양 경계에서의 모수화(parameterization) 최적화 과정을 수행하였다. 이를 통해 2018년 8~10월과 태풍 솔릭 사례에 대하여 국립해양조사원 조위 관측자료를 이용한 통계 방법을 적용하여 검증을 수행하고, 이를 POM(Princeton Ocean Model) 기반의 예측모델 결과와 비교하였다. 수행결과 NEMO 기반의 폭풍해일 예측시스템이 POM 기반의 예측결과에 비해 평균오차와 RMSE가 각각 약 29%와 약 20% 감소한 것으로 나타났으며, 태풍 시기에도 NEMO 기반 예측결과에서 전반적으로 오차가 낮게 나타났다.

핵심용어 : 조석, 폭풍해일, NEMO, 지역모델

Abstract : In this study we established an operational storm-surge system for the northwestern pacific ocean, based on the NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean). The system consists of the tide and the surge models. For more accurate storm surge prediction, it can be completed not only by applying more precise depth data, but also by optimal parameterization at the boundaries of the atmosphere and ocean. To this end, we conducted several sensitivity experiments related to the application of available bathymetry data, ocean bottom friction coefficient, and wind stress and air pressure on the ocean surface during August–September 2018 and the case of typhoon SOULIK. The results of comparison and verification are presented here, and they are compared with POM (Princeton Ocean Model) based Regional Tide Surge forecasting Model (RTSM). The results showed that the RTSM_NEMO model had a 29% and 20% decrease in Bias and RMSE respectively compared to the RTSM_POM model, and that the RTSM_NEMO model had a lower overall error than the RTSM_POM model for the case of typhoon SOULIK.

Keywords : tide, storm surge, NEMO, regional model

1. 서론

바다에서의 파랑의 발생은 주로 바람에 의한 것(Kinsman, 1984)이며, 이와 동시에 해면에 작용하는 바람의 전단응력과 허리케인, 태풍, 폭풍, 열대성 저기압 등의 기압차로 인해 해수면이 비정상적으로 상승하는 현상으로 연안에서의 수위 상승이 유발되는데, 이러한 위험기상적인 요인에 의한 해면의 상승을 폭풍해일(storm surge)이라고 부른다. 폭풍해일은 해

수면 전체가 상승하여 연안을 범람시키는 해안재해 중 가장 위력적인 재해다. 또 이렇게 발생한 해일이 관성을 갖고 전파되는 과정에서 지형, 수심, 지구자전 등의 효과를 받기도 하고, 또 조석, 조류가 큰 지역에서 조석과의 비선형 상호작용을 거쳐 변형되며 특정지형 조건하에서는 공명 현상 등에 의해 증폭되기도 한다. 이 외에 폐쇄성 소만이나 하구 등 지역에서는 태풍에 수반된 집중강우가 일시적인 해면 상승을 증가시키기도 한다. 보통 해수면의 상승 정도는 대체로 풍속의

*국립기상과학원 현업운영개발부 예측모델연구팀 연구원(Corresponding author: Nary La, Researcher, Marine & Asian Dust Modelling Team, Operational Systems Development Department, National Institute of Meteorological Science, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea, Tel: +82-64-780-6591, Fax: +82-64-738-6514, lanary124@gmail.com)

**국립기상과학원 현업운영개발부 기후모델개발팀 선임연구원(Senior Researcher, Climate Model Development Team, Operational Systems Development Department, National Institute of Meteorological Science)

***국립기상과학원 현업운영개발부 예측모델연구팀 연구관(Senior Research Scientist, Marine & Asian Dust Modelling Team, Operational Systems Development Department, National Institute of Meteorological Science)

****국립기상과학원 현업운영개발부 예측모델연구팀 연구관(Senior Research Scientist, Marine & Asian Dust Modelling Team, Operational Systems Development Department, National Institute of Meteorological Science)

제곱에 비례하지만, 해안선의 형태나 길이, 수심 등에 따라 달라진다. 따라서 해안선과 만 형태에 따라 그 위험성의 차이가 있다.

그 중 태풍 발생 시 동반하는 기상조위는 태풍 중심의 저기압에 의한 해수면상승과 태풍의 강한 강풍에 의해 해수가 연안 쪽으로 밀려 올라가는 현상(wind setup)이 중첩되어 발생한다. 이러한 기상조위는 천문조에 의한 만조와 중첩될 경우 수위는 더욱 상승하여 연안지역에 막대한 피해를 가져오는 재해 요인 중 하나로 분류되며(Ku et al., 2019), 특히 우리나라 서해안과 남해안은 조석 간만의 차가 커서 해일이 생기기 쉽기 때문에 폭풍해일이 언제, 어떤 형태로 밀려올지 예측하기는 어려우며, 크고 작은 항구의 구조물, 연안시설 및 정박한 선박들이 매년 큰 피해를 받고 있다. 특히 침수에 따른 해안 재산, 인명 손실이 수반된다. 향후 태풍의 발생 빈도가 증가할 것으로 예측되며 더불어 재해규모도 증대될 것으로 예상되고 있어 이에 따른 대비가 필요하다.

국립기상과학원에서는 2006년에 POM(Princeton Ocean Model; Mellor, 1998) 기반의 지역 조석/폭풍해일예측모델(RTSM, Regional Tide/Storm surge Model)을 개발하여 현업에 도입하였다. 이 모델(RTSM_POM)은 수평해상도가 8 km이며, 지역 대기모델인 RDAPS(Regional Data Assimilation Prediction System)의 10 m 해상도 및 해면기압 예측장을 이용하여 87시간 예측을 수행하였다(You and Seo, 2009).

현재 기상청에서는 전지구 해양자료동화시스템과 기후예측모델(GloSea5) 등에 포함되는 해양순환모델을 NEMO(Nucleus for European Modelling of the Ocean)로 운영 중에 있다. 이후 해양순환모델과의 시너지를 창출하고 슈퍼컴퓨터 환경에서 효율적인 사용을 위해 지역폭풍해일예측시스템을 POM 기반에서, 폭넓은 커뮤니티에서 지속적으로 개발이 되고 있는 NEMO 기반의 구성으로 전환하는 프로젝트를 시작했다. NEMO 기반으로 전환하면 NEMO 내에 존재하는 옵션들과 향후 릴리스를 위해 계획된 다양한 최신 옵션들을 폭풍해일 모델에 보다 쉽게 적용하여 연구개발에 활용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 NEMO(Madec, 2016) 수치모델을 기반으로 RTSM_POM과 동일한 영역으로 폭풍해일 모델을 구축하였으며, 폭풍해일예측시스템의 예측성을 높이기 위해 조석과 해일에 영향을 미치는 조건을 고려하는 민감도 실험을 수행하였다. 또한 NEMO 기반의 예측모델 결과와 RTSM_POM 모델 예측 결과를 국립해양조사원에서 운영하는 우리나라 주변해역의 주요 검조소 자료를 이용하여 함께 비교 분석하였다.

2. 모델 및 실험 방법

2.1 모델개요

NEMO는 해양 모델링 프레임 워크로 CeCILL 라이선스에 따라 배포되며 많은 커뮤니티에서 해양학 연구 및 예측에 사용되고 있다. 그리고 2008년부터 CNRS(프랑스), Mercator-

Ocean(프랑스), NERC(영국), Met Office(영국), CMCC(이탈리아) 및 INGV(이탈리아)를 포함한 유럽 컨소시엄 내에서 개발을 공유하고 있다. 영국은 CS3X(Extended Area Continental Shelf Model)을 NEMO 3.6버전 기반으로 EMODNet의 수심 자료를 사용하여 7 km 해상도로 매일 4회 7일 예측으로 운영 중에 있으며, 캐나다의 경우 NEMO와 FVCOM(finite-volume Coastal Community Model)을 기반으로 하는 모델 예측결과를 함께 제공하고 있다(Soontiens et al., 2016).

본 연구에서는 NEMO 기반의 지역 폭풍해일예측시스템(RTSM_NEMO)을 개발하였다. 기반모델인 NEMO는 버전 3.6을 채택하였고, 해양의 수온과 염분 변화인 밀도에 의한 해수면 변화를 무시한 순압(barotropic) 흐름으로 가정하여 연직방향 확산 및 이류와 같은 물리과정을 제거하였다. 또한 발생할 수 있는 인위적인 압력 경도 오차(horizontal pressure gradient error)를 줄이기 위해 새로운 수평 기압경도법을 도입한 지형좌표(terrain-following sigma coordinate)를 사용하였다.

모델 영역은 동북아시아 영역을 포함하는 20°N-52°N, 115°E-150°E로 위도와 경도방향으로 1/12° 크기의 격자로 약 8km의 공간해상도를 가지며, 해양 수심 격자 구성을 위하여 National Aeronautics and Space Administration(NASA)에서 생산하는 고해상도 수심 자료 Shuttle Radar Topography Mission(SRTM, Becker et al., 2006)에서 30 min 자료를 이용하였다(Fig. 1). 수치 모델의 개발경계 입력조건은 오리건주립 대학교(Oregon State University)에서 제공하고 있는 TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO(OTPS)를 사용하였다. TPXO 7.2는 라플라스 조석방정식과 2002년부터 TOPEX/POSEIDON 트랙을 따르는 TOPEX/Poseidon, Jason 위성의 진행방향에 대한 평균 자료를 OTIS와 함께 사용한 자료로 가장 잘 맞는 전지구 해양 조석 모델의 최신 버전이다. 모델을 계산하는데 사용된 방법은 Egbert et al.(1994), Egbert and Erofeeva(2002)에 자세히 설명되어 있다. 조석은 8개의 1차 조화성분인 M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1 분조와 2개

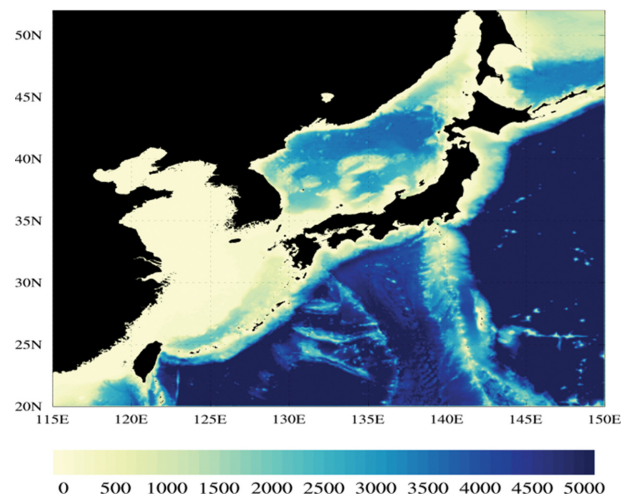
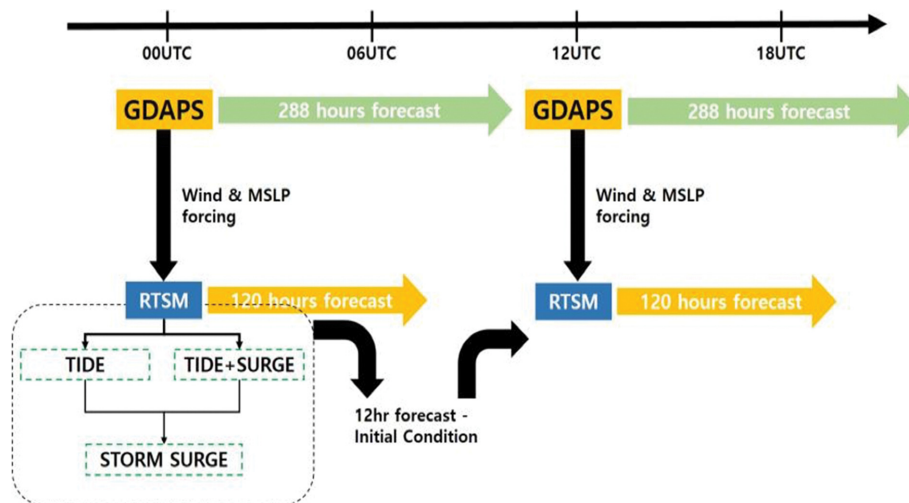


Fig. 1. RTSM-NEMO model domain with topography (m).

Table 1. Model comparison of configuration between RTSM_POM and RTSM_NEMO

Name	RTSM_POM	RTSM_NEMO
Model	POM	NEMO3.6
Input data	RDAPS (10 m wind, MSLP)	GDAPS (10 m wind, MSLP)
boundary data	NAO	OTPS
Prediction & starting time	87 hour (00, 12 UTC)	120 hour (00, 12 UTC)
Coordinate	Spherical coordinate	
Domain	115°E-150°E, 20°N-52°N	
Spatial Resolution	1/12° (421 × 385)	
Initial data	-12 hour forecast	

**Fig. 2.** Schematic diagram of the operational cycle of the regional storm surge forecast system.

의 장주기 조화성분인 Mf, Mm 분조 및 3개의 비선형 조화 성분인 M4, MS4, MN4 분조를 1/4도 해상도의 전지구 격자로 지원하며, 13개 분조의 조화상수 값을 외력조건으로 하였 다(Table 1).

RTSM_NEMO 모델에서 사용되고 있는 대기 입력 자료는 기상청에서 제공하는 전지구 대기 예보시스템(GDAPS: Global Data Assimilation Prediction System)의 10 m 고도의 해상풍과 해면기압 예측 자료를 폭풍해일 모델 격자에 맞게 선형 내삽법을 사용하여 1시간 간격마다 자료가 입력되어 수행된다. 현재 GDAPS는 2018년 6월 이후로 일부 재정되어 UM(Unified Model, ver.10.8) 기반으로 수평해상도가 기존의 17 km에서 10 km로 증가하였고, 연직으로 70개 층으로 이루어져 있으며, 하루에 2회 운영되며 12일까지 예측 자료가 생산된다.

모델의 초기장은 12시간 전의 폭풍해일 예측장을 이용함으로써 모델이 가지고 있는 해일 성분을 유지하였다. Fig. 2은 RTSM_NEMO 모델의 운영 모식도로 GDAPS가 수행된 후 해상풍과 해면기압 예측 자료를 이용하여 하루에 2회 운영되며, 1시간 간격 5일 예측으로 수행되는 과정을 보여주고 있다. RTSM_NEMO 모델은 조석(TIDE) 모델이 수행되면서 조석 효과에 의한 천문조를 예측을 하며, 여기에 해상풍과 해면기압의 영향을 포함한 해일(TIDE + SURGE) 모델로 나뉘

어 수행하며, 두 모델의 차이를 구하여 2차원 폭풍해일고 (STORM SURGE)를 산출할 뿐만 아니라 주요 연안 지점의 120시간 천문조/기상조를 산출하고 있다.

2.2 실험방법

각 실험은 조석과 해일을 분류하여 구성하였다. 폭풍해일은 바람과 기압의 변화에 의해 야기된 해수면 변화를 나타내므로, 총 해수면 변화에서 조위에 의한 변화량을 제거하여 구하기 때문에 먼저 조석의 예측 성능이 검증되어야 한다. 따라서 조석모델의 성능평가를 위해 수심 변화에 따른 실험과 바닥마찰계수변화에 따른 실험을 통해 조석에 어떠한 영향을 주는지 확인할 수 있었으며, 조석 민감도 실험에 대한 결과를 이용하여 해일 민감도 실험인 바람응력과 기준기압에 대한 실험을 수행하였다(Table 2).

Table 2. Description of model sensitivity experiments and values

Tide experiments	Charnock parameter	Surge experiments	Reference pressure level
CF02	0.02	RF10	1010 hPa
CF03	0.024	RF12	1012 hPa
CONT	0.0275	CONT	1013 hPa
CF04	0.035	RF14	1014 hPa

Table 3. Basic information of the tidal gauging stations

No	Station	Name	Longitude	Latitude
1	MUKH	Mukho	129.116	37.550
2	SOKC	Sokcho	128.594	38.207
3	HUPO	Hupo	129.453	36.678
4	POHA	Pohang	129.384	36.047
5	ULSN	Ulsan	129.387	35.502
6	ANHG	Anheung	126.132	36.674
7	INCH	Incheon	126.592	37.452
8	PYOT	Pyeongtaek	126.823	36.967
9	WIDO	Wido	126.302	35.618
10	YONG	Yeonggwang	126.421	35.426
11	MOKP	Mokpo	126.376	34.780
12	JIND	Jindo	126.309	34.378
13	GOHG	Goheung	127.343	34.481
14	TONY	Tongyeong	128.435	34.828
15	BUSN	Busan	129.035	35.096
16	CHUJ	Chujado	126.300	33.962
17	JEJU	Jeju	126.543	33.528
18	MOSL	Moseulpo	126.251	33.214
19	SOGW	Seogwipo	126.562	33.240
20	SEOS	Seongsanpo	126.928	33.475

2.3 관측자료

본 연구에서 사용한 관측자료는 국립해양조사원에서 제공되는 자료로, 운영중인 검조소 중 결측이 없는 검조소 20개를 선정하여 1시간 간격의 관측자료를 이용하였다. 조위관측소 위치는 Fig. 3에 도시하였으며, 명칭 및 위치는 Table 3과 같

다. 3.1절과 3.2절의 실험 조건을 적용하여 2018년 8월 1일 00 UTC부터 2018년 10월 31일 12 UTC까지 RTSM_NEMO 모델을 수행하였으며, RTSM_POM 모델 예측 결과와 관측 자료를 비교하여 예측 성능을 평가하였다.

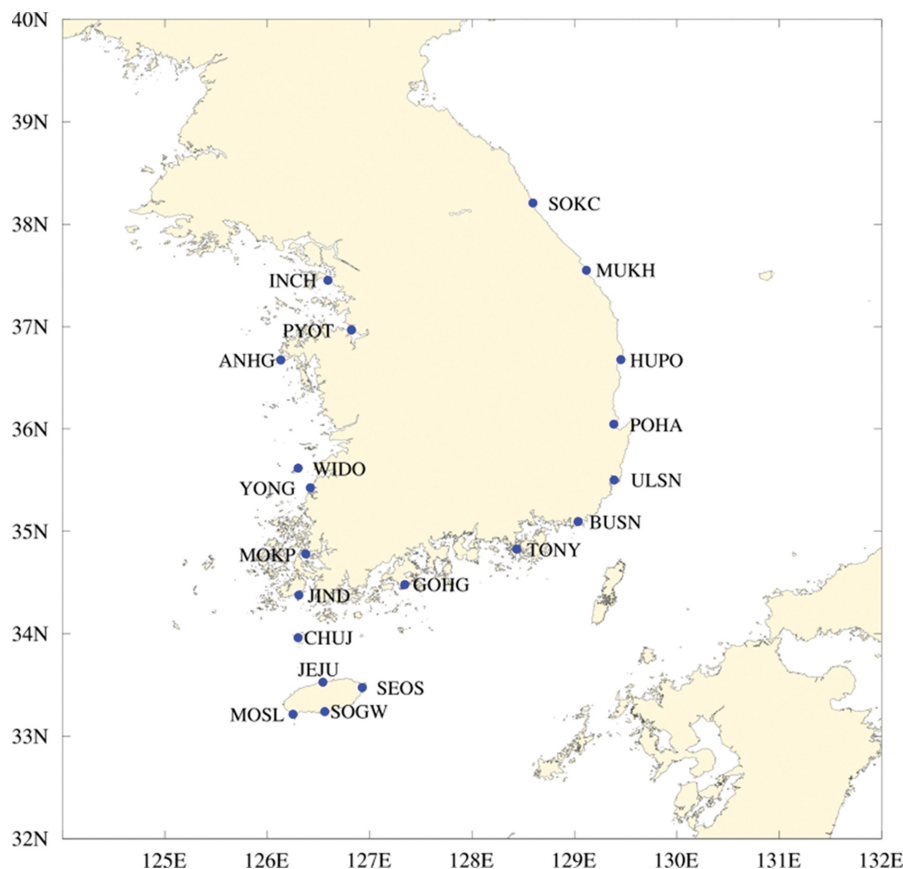
3. 민감도 실험 결과

3.1 수심 및 바닥마찰계수에 따른 영향평가

조석은 해안의 크기, 형태와 수심 등에 따라 다르게 나타나며 같은 지점이라 하더라도 월령과 계절 등에 의해 변화하기 때문에 먼저 조석의 예측 성능이 검증되어야 한다. 외해에서 발생한 조석이 대륙사면과 대륙붕으로 이동하면서 수심의 영향을 받으며, 연안을 오른쪽에 두고 평행하게 이동하는 켈빈파 형태로 진행하기 때문에 모델 영역에서의 등조시선(cotidal line)과 등조고선(corange line) 및 무조점의 위치가 정확해야 한다. 이를 확인하기 위해 먼저 모델의 수심 조건에 따른 영향을 비교하였다. 켈빈파는 다음과 같이 파장의 단순한 조화형식(harmonic form)으로 표현할 수 있다.

$$F(x - ct) = \cos \frac{2\pi}{\lambda}(x - ct) \quad (1)$$

주기 $T = \lambda/c$ 로 주어지므로 $k = 2\pi/\lambda$, $\sigma = 2\pi/T$ 로 나타낼 수 있으며, 그 해 (solution)는 다음과 같다.

**Fig. 3.** Location map of the tidal gauging stations, Korea.

$$\zeta = Ae^{-y/b} \cos(kx - \sigma t) \quad (2)$$

$$u = Ue^{-y/b} \cos(kx - \sigma t) \quad (3)$$

여기서 $U = \frac{c}{h}A$, $b = \frac{c}{f}$, $c = \sqrt{gh}$ 를 나타내며, g 는 중력 가속도, h 는 수심, f 는 코리올리 파라미터, A 는 파의 진폭을 나타낸다. 따라서 U 와 A 는 수심 h 의 변화에 반비례하므로 보다 정확한 조석의 예측을 위해 정밀한 수심자료의 적용이 요구된다. 그러므로 모델에서 사용되는 수심차이로 인해 파의 속도가 달라져 조석 타이밍에 영향을 미친다. 이러한 공간적 범위와 차이의 크기를 비교하기 위해, BODC(British Oceanographic Data Center)에서 제공하는 GEBCO(The General Bathymetric Chart of the Oceans) 수심자료, SRTM의 수심자료를 사용하여 비교하였다. GEBCO 수심자료는 수로등고선 및 수심음향차트에 수심 측정자료를 보간한 자료이며(Goodwillie, 2003), SRTM은 ASTER 디지털 고도모델에서 제공하는 최상의 데이터를 기반으로 하는데, IBCAO 데이터베이스를 포함하고

Smith and Sandwell v.18.1의 중력모델 자료를 보간한 자료를 나타낸다(Becker et al., 2006). GEBCO 자료는 SRTM 자료에 비해 대체로 매끄러운(smoothing) 형태를 보이며, SRTM이 다른 자료와 비교하여 비교적 현실적인 수심으로 확인되었고, 특히 서해에서 그 차이가 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 4는 모델 영역 중 조석 차가 큰 서해와 남해를 중심으로 수심 100 m 이하에 대해 시각적으로 나타내었다. 모든 수심자료에서 전반적으로 지형의 분포가 비슷하지만 제공되는 해상도에 따라 차이가 나타났으며, SRTM이 서해를 가장 자세히 표현하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 100 m 이하의 경우, GEBCO에서는 서해의 경계 (123.5 E)가 뚜렷이 구분되며, 또한 서해 연안지역과 남해 연안지역에서 GEBCO 자료의 수심이 20 m 이상 깊은 지역적 차이를 보이고 있다. 두 수심 자료를 이용하여 M2 분조에 대한 위상과 진폭을 비교하였을 때(Fig. 5), 무조점의 위치, 위상, 진폭 등 SRTM을 이용한 모델결과가 관측값 Fig. 5(a)와 거의 유사함을 알 수 있다. 그리고 수심은 진폭보다 위상에 큰 영향을 미치는 것

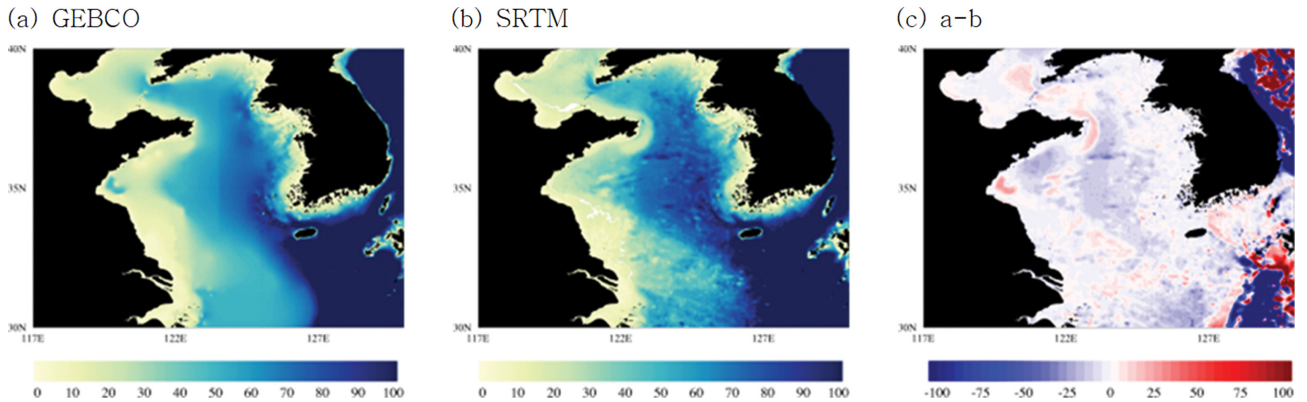


Fig. 4. Bathymetric comparisons between (a) GEBCO and (b) SRTM. In the bathymetry difference plot (c), differences are only shown between -100 m and 100 m.

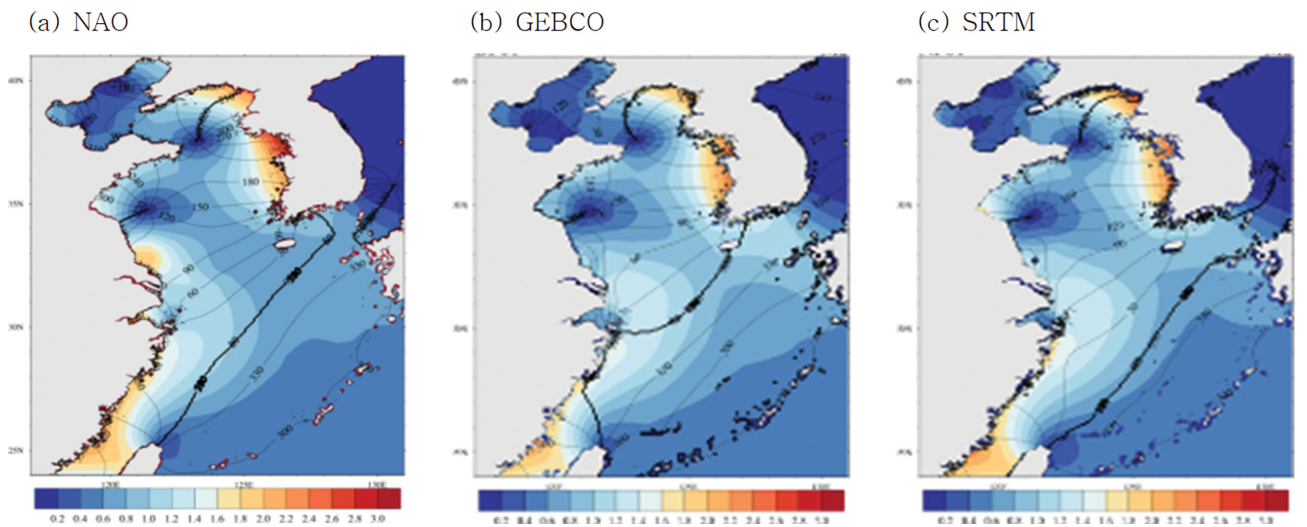


Fig. 5. Co-tidal charts of (a) NAO, (b) GEBCO and (c) SRTM bathymetry in yellow sea and East China Sea. The color shade is tidal harmonic amplitude in m and contour lines are tidal harmonic phase lag in degrees for M2.

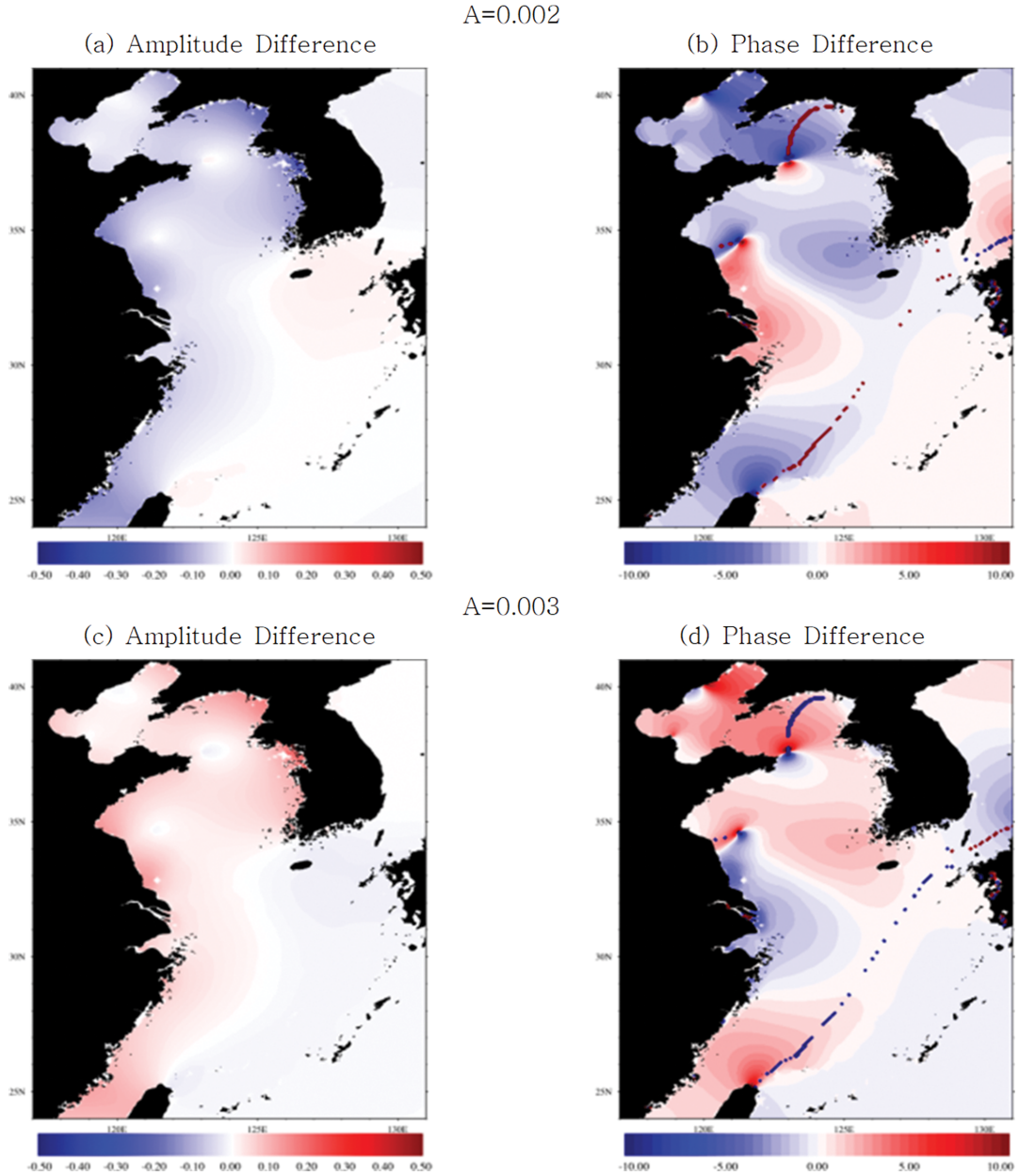


Fig. 6. Difference in amplitudes (m) and phase (degrees) for M2 constituent between the control run ($A = 0.0025$) and experiment ($A = 0.002$) (a, b), and between the control ($A = 0.0025$) and experiment ($A = 0.003$) (c, d).

을 알 수 있다.

심해에서 장파의 바닥 마찰의 효과는 미미하지만, 천해로 전달되면 그 효과는 중요해진다. 따라서 천해에서 전달되는 바닥 마찰 효과를 고려하기 위해 Madec(2016)에서 설명한 비선형 모수화가 가장 적절하다고 판단하였다. 이 방법은 바닥 마찰로 인한 플릭스 f 는 바닥 층에서의 속도 U 에 비례한다고 가정한다.

$$F = \frac{r}{z} U \quad (4)$$

여기서 r 은 항력 계수(drag coefficient)이고, h 는 바닥 층의 높이를 나타낸다. Bed stress는 비선형 공식을 사용하며, r 은

다음의 해류 속도와 비례한다.

$$r = A \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

여기서 A 는 사용자 정의 계수이다. A 의 값에 대한 모델의 민감도 실험은 0.0025를 기준 값으로 0.002와 0.003의 값으로 모델을 수행하여 비교하였다. Fig. 6은 마찰계수에 따른 위상과 진폭의 차이를 나타낸 그림으로, A 가 기준값보다 작은 0.002의 경우 마찰력이 감소되어 진폭은 증가하게 되며, 0.003으로 큰 경우 마찰력이 증가하여 진폭이 감소하는 것을 알 수 있었다. 위상의 경우 기준 값보다 크거나 작을 때 대체로 증가 또는 감소 하지만 그 정도의 차이는 크지 않았으며 한반도 연안 특히 서해안에서는 거의 변화가 없음을 보였다.

3.2 바람응력 및 기준기압에 따른 영향평가

3.1 결과를 기반으로 해수표면에서 대기의 영향을 미치는 바람응력과 기준 기압에 따른 실험을 각각 수행하였다. 실험을 하기 위해 사용한 대기 입력장은 기상청 지역 대기예보모델(RDPS)에서 예측되는 10 m 바람장과 해면기압을 사용하였으며, 예측장은 1시간 간격으로 87시간 자료를 산출한다. 각 실험은 조석성분을 포함한 폭풍해일 모델과 조석 성분만 포함한 모델을 수행하여 폭풍해일고를 산출하였으며, 국립해양조사원의 조위 자료와 함께 비교 검증하였다.

일반적으로 해면은 바람의 영향으로 해면 형태가 일정하지 않으며 불규칙하게 파랑이 존재하게 된다. 표면 바람 응력은 해수 표면에 대한 바람의 방향과 크기의 함수이고, 마찰 속도와 표면 거칠기 길이를 필요로 한다. 따라서 바람응력은 바람이 불어가는 방향으로 해수면 변화를 야기하기 때문에 해일에 영향을 주는 요소 중 하나로, 해수 표면에서의 바람 응력은 RTSM_NEMO 모델에서 다음과 같은 이차 방정식을 사용하여 계산된다.

$$\begin{aligned}\tau_{sx} &= \rho_a \cdot C_D \cdot |W_{10}| \cdot W_{10x} \\ \tau_{sy} &= \rho_a \cdot C_D \cdot |W_{10}| \cdot W_{10y}\end{aligned}\quad (6)$$

여기서 C_D 는 항력계수로 Charnock(1955)에 의해 아래와 같이 계산된다.

$$C_D = \left(\frac{0.41}{\log \frac{10}{z_0}} \right)^2 \quad (7)$$

여기서 z_0 = 표면 거칠기를 나타내며, $z_0 = \left(\frac{a}{g} \right) u^{*2}$ 로 계산된다.

이 계산에서 u^* = 마찰속도, g = 중력가속도, a = Charnock 매개 변수로 경험적인 상수 값을 가진다. 이 계수는 파동에 따라 다르지만 0.012~0.035 범위의 값으로 정해지는 경우가 많으며(Brown and Wolf, 2009), Wu(1982)에서 제안된 값은 0.0185로 모든 파랑에서 좋은 성능을 보였다. Williams and Flather(2000)은 영국기상청 폭풍해일 예측 모델인 CS3X에 0.0275를 적용하였고, Mastenbroek et al.(1993)은 북해 모델링에 적합한 값으로 0.032를 제시하였다. 이 결과를 고려할 때 매개변수에 따른 해수면 높이의 차이를 보기 위해 0.02, 0.024, 0.0275, 0.035에 대해 실험을 수행하였으며, 기준기압의 매개변수는 1013 hPa을 적용하였다(Table 2). 각각 실험 간의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았지만 매개변수가 큰 경우 오차가 큰 것을 알 수 있었다(Table 4).

대기압에 의한 해수면 반응은 대기압이 증가하면 해수면이 감소하는 역기압계 효과(inverted barometer effect)를 포함하므로 RTSM_NEMO 모델에서는 해수면 높이를 보정하기 위해 기준 기압을 사용하여 전체 도메인에 대해 조정할 수 있다. 대기 강제력은 아래의 공식을 따른다.

$$n_{ib} = -\frac{1}{g\rho}(P_{atm} - P_0) \quad (8)$$

여기서 P_{atm} = 대기압 평균, P_0 = 기준기압을 나타낸다. n_{ib} 의 기울기는 운동방정식에 추가되어 총 해수면 높이가 계산된다. RTSM_NEMO 모델의 기본값은 1010 hPa이며 RTSM_

Table 4. RMS errors in the residual water level at each station

Stations	Exp.	Wind stress				Reference pressure level			
		CF02	CF03	CONT	CF04	RF10	RF12	CONT	RF14
WEST	INCH	0.162	0.163	0.164	0.166	0.176	0.159	0.164	0.154
	PYOT	0.165	0.166	0.167	0.169	0.178	0.163	0.167	0.159
	ANHG	0.122	0.122	0.122	0.122	0.136	0.115	0.122	0.110
	WIDO	0.115	0.114	0.114	0.114	0.126	0.109	0.114	0.104
	YONG	0.127	0.127	0.127	0.126	0.138	0.122	0.127	0.118
SOUTH	MOKP	0.166	0.167	0.167	0.169	0.177	0.163	0.167	0.160
	DAEH	0.093	0.092	0.091	0.090	0.103	0.086	0.091	0.083
	GOHG	0.086	0.086	0.086	0.086	0.099	0.081	0.086	0.076
	TONY	0.095	0.095	0.096	0.097	0.111	0.089	0.096	0.083
	BUSN	0.090	0.090	0.090	0.091	0.107	0.083	0.090	0.076
EAST	ULSN	0.087	0.088	0.088	0.089	0.106	0.079	0.088	0.071
	HUPO	0.091	0.091	0.092	0.093	0.111	0.083	0.092	0.073
	MUKH	0.097	0.098	0.099	0.100	0.117	0.090	0.099	0.081
	SOKC	0.095	0.095	0.096	0.097	0.115	0.086	0.096	0.077
	POHA	0.090	0.090	0.091	0.092	0.109	0.082	0.091	0.073
JEJU	CHUJ	0.086	0.085	0.085	0.084	0.097	0.080	0.085	0.076
	JEJU	0.080	0.080	0.080	0.081	0.093	0.075	0.080	0.071
	MOSL	0.071	0.070	0.070	0.069	0.083	0.064	0.070	0.061
	SEOS	0.080	0.080	0.080	0.079	0.093	0.074	0.080	0.069
	SOGW	0.064	0.064	0.063	0.063	0.077	0.058	0.063	0.054
MEAN		0.103	0.103	0.103	0.104	0.118	0.097	0.103	0.091

POM 모델에서는 1013 hPa를 사용하였다. 따라서 기준 기압에 대한 실험은 1010, 1012, 1013 및 1014 hPa 사용하여 수행하였으며(Table 2), Charnock 매개 변수는 0.0275를 기준으로 적용하였다. 그 결과 RF10 실험이 가장 큰 오차를 나타냈으며, CONT, RF12, RF14 순으로 나타났다. 대부분 실험에서 오차의 값은 서해가 가장 컸으며 제주해역에서 작게 나타났지만, 서해, 남해, 동해, 제주 해역 순으로 개선된 것을 확인할 수 있었다. 바람응력 실험은 매개변수 변화에 따라 뚜렷한 변화는 볼 수 없었지만, 기준기압 RF14 실험에서 바람응력 0.0275, 기준기압 1014 hPa를 사용하였을 때 가장 좋은 결과를 나타내었다. 실험에서 사용한 매개변수의 조합보다 좋은 값이 있을 수 있겠지만 본 연구에서는 RF14 실험 결과를 이용하기로 하였다.

4. RTSM_POM 모델과 RTSM_NEMO 모델의 예측성 비교

민감도 실험을 통해 정해진 최적의 매개변수를 이용하여 예측 성능을 비교하기 위해 RTSM_POM 모델과 RTSM_NEMO 모델을 분석 기간 동안 수행하였으며, 해역별 예측성을 보기 위해 Table 4와 같이 해역별 5개 검조소에 대해 예측시간별 동일한 자료 수를 평균하여 비교 검증하였다. 관측 자료와 비교하기 위해 식(9)와 (10)을 이용하여 예측시간별 편차(Bias) 및 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error; RMSE)를 계

산하여 관측값과 비교 하였으며, 두 식에서 통계값이 0에 가까울수록 관측값과 예측값이 서로 유사한 것을 의미한다. 검증 시 예측값은 검조소 지점과 가까운 한 지점과 비교를 하였다.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (10)$$

Fig. 8(a), (b)는 전체 분석 기간을 평균하여 예보 시간에 따른 RTSM_POM 모델과 RTSM_NEMO 모델의 예측 결과의 편차와 RMSE를 나타낸 것이다. 검은색은 RTSM_POM 모델의 예측 결과이고 빨간색은 RTSM_NEMO 모델의 예측 결과이다. 편차를 비교 했을 때 두 모델 모두 과소 모의하는 경향이 나타났으나 개선 후 RTSM_NEMO 모델이 RTSM_POM 모델에 비해 크게 감소하였으며, 예측시간별 26%, 30%, 32%, 31% 정도 오차가 감소하였다. RMSE의 경우 또한 RTSM_POM 모델에 비해 예측 시간에 대하여 예측 성능이 약 20% 이상 향상한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8(c), (d)는 전체 분석 기간을 평균하여 제주, 남해, 서해, 동해 해역으로 나누어 예측 시간에 따른 편차와 RMSE를 누적 막대그래프로 비교하였다. 편차와 RMSE에서 큰 해역은 서해이며 작게 나타난 해역을 동해이며, 모든 해역에서

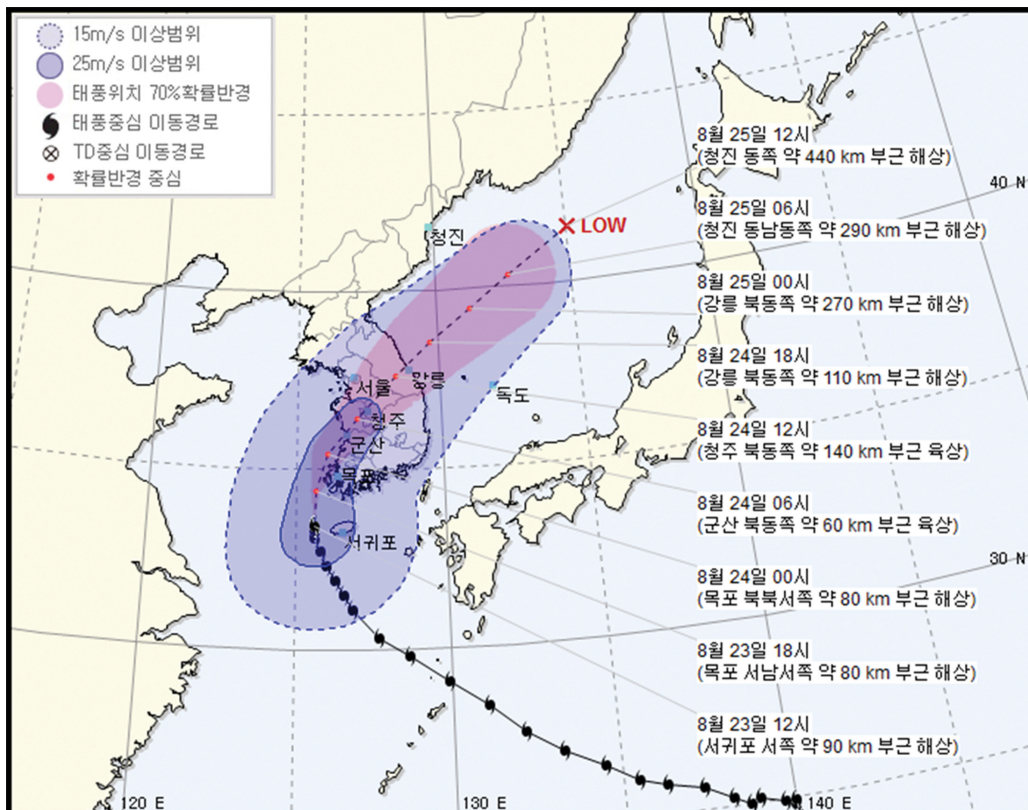


Fig. 7. Track of Typhoon SOULIK.

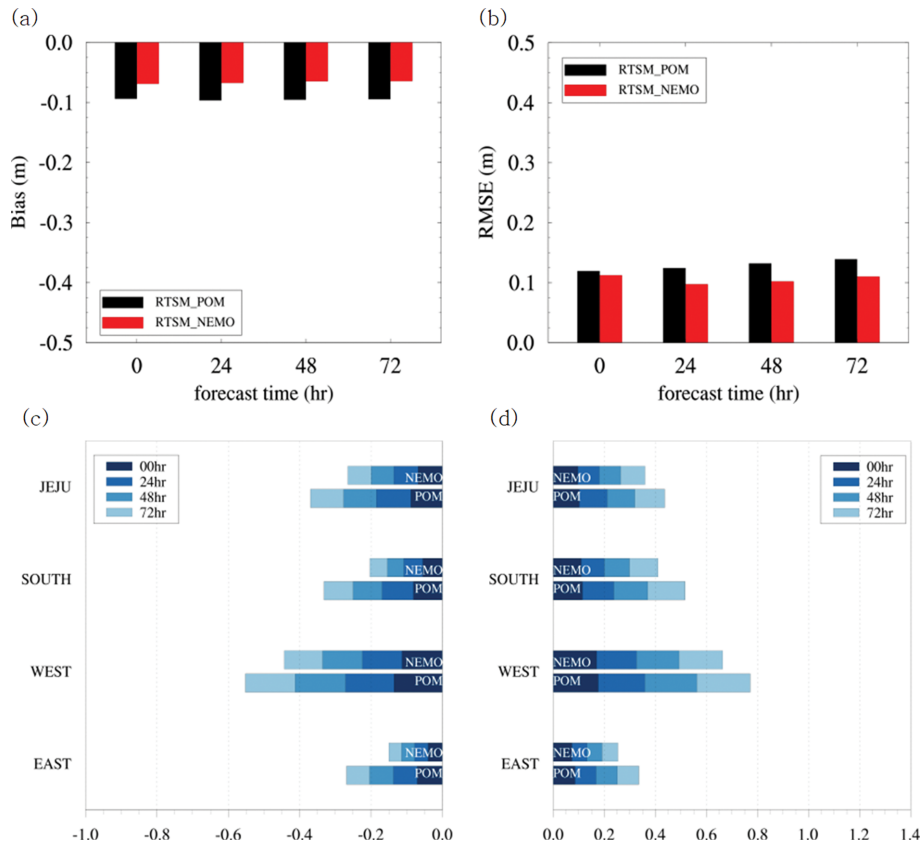


Fig. 8. Comparison between RTSM_POM and RTSM_NEMO for 3 month mean. (a) Bias and (b) RMSE is mean stick graph of surge heights variation at 00, 24, 48, 72 hours, (c) Bias and (d) RMSE is cumulative stick graph in each regional sea.

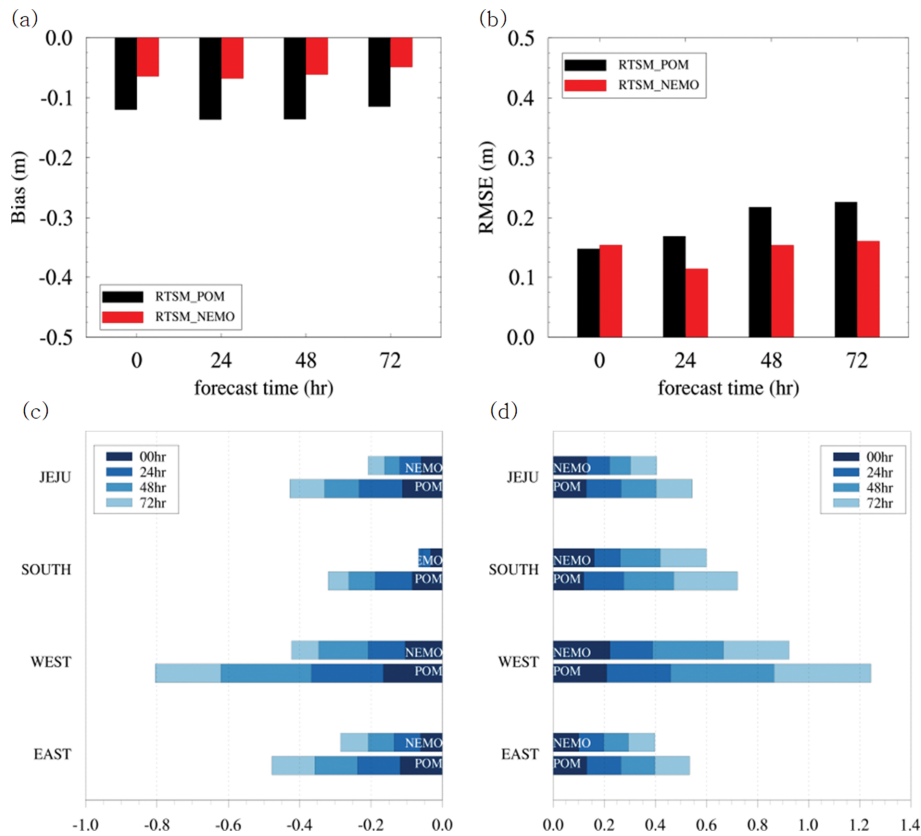


Fig. 9. Comparison between RTSM_POM and RTSM_NEMO for the case of Typhoon SOULIK. (a) Bias and (b) RMSE is mean stick graph of surge heights variation at 00, 24, 48, 72 hours, (c) Bias and (d) RMSE is cumulative stick graph in each regional sea.

과소 모의하는 경향을 보이거나 동해, 남해, 제주, 서해 순으로 RTSM_POM 모델에 비해 RTSM_NEMO 모델이 편차와 RMSE가 줄어들었다.

Fig. 9는 태풍 등 위험 기상 시 모델의 예측 성능을 알아보기 위해 2018년 제 19호 태풍 ‘솔릭(SOULIK)’ 사례 기간 동안의 결과를 나타낸 것이다. 태풍 솔릭은 2018년 8월 16일 09시에 태풍으로 발생하여 중심 기압이 955 hPa, 최대풍속 40 m/s까지 발달했으며, 2018년도 한반도를 지나간 첫 태풍으로, 8월 23일 전남 목포 부근에 상륙해 광주와 대전, 충주, 평창 등을 거쳐 8월 25일 3시에 온대저기압으로 변질되면서 소멸되었다(Fig. 7). 태풍 솔릭 기간에도 편차는 과소 모의하는 경향을 보이지만 약 50% 이상 RTSM_POM 모델에 비해 오차가 감소하였으며, RMSE의 경우 초기 시간을 제외한 나머지 예측 시간에서 예측 성능이 약 30%의 예측 향상된 것을 확인할 수 있었다. 해역으로 나누어 비교하였을 때, 대부분 해역에서 편차가 크게 개선되었으며, 남해의 경우 예측 시간이 늘어나면서 과대 모의하여 누적 편차가 작게 나타났으며, 조차가 큰 서해에서 위험기상 시 다른 해역에 비해 편차와 RMSE가 낮게 나타난 것을 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 NEMO 기반의 지역 폭풍해일예측시스템을 개발하기 위해, 우리나라 주변해역을 포함하는 북서태평양 영역의 모델을 구축하여 민감도 실험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 2018년 8월부터 10월까지 수치실험을 수행하여 예측 성능을 검증하였다. 실험은 조석과 해일에 영향을 미치는 요소가 다르기 때문에 크게 두 가지로 나누어 진행하였다. 조석의 경우 수심변화에 따른 실험과 마찰계수변화에 따른 실험을 통해 조석에 어떠한 영향을 주는지 확인하였다. GEBCO와 SRTM 수심 자료를 적용하여 두 수심의 차이가 조석에 어떠한 영향을 주는지 확인하였고, 수심의 경우 진폭보다 위상에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 마찰계수 변화 따른 실험 결과, 계수가 작아지면 마찰력이 감소되어 진폭이 증가하게 되며, 반대로 계수가 큰 경우 진폭이 감소하는 것을 알 수 있었다. 위상의 경우 마찰계수에 따라 증감은 나타나지만 그 정도가 크지 않았다. 해일의 경우 바람 응력과 기준 기압에 의한 해일고 변동 민감도 실험을 수행하였다. 바람응력에 따른 민감도 실험 결과, 우리나라 대부분 해안에서 뚜렷한 차이점을 보이지 않았지만, 서해에서 변동 폭이 크게 나타났으며 풍속이 증가할수록 그 차이가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 바람 응력 실험 결과를 기반으로 최적의 매개 변수는 0.0275로 결정하였다. 기준 기압 실험의 경우에도 검조소별 차이는 뚜렷하지 않았지만, 서해, 남해 동해안의 지역적인 차이가 있음을 확인하였다. 네 가지 사례 실험의 결과 최적의 매개 변수는 1014 hPa로 결정하였다.

민감도 실험을 통해 정해진 최적의 매개변수를 RTSM_

NEMO 모델에 적용하여, 약 3개월간의 수치실험을 수행하였고, 국립해양조사원 조위자료를 이용하여 검증하고 RTSM_POM 모델 결과와도 비교하였다. 실험기간에 대해, RTSM_NEMO 모델이 RTSM_POM 모델에 비해 평균오차와 RMSE가 각각 약 29%와 약 20% 감소한 것으로 나타났으며, 태풍 시기에도 전반적으로 RTSM_NEMO 모델에서 오차가 낮게 나타났다. 특히 서해 연안지역에서의 오차 감소폭이 크게 나타났다. 이러한 결과는 RTSM_NEMO 모델을 개발하면서 적용한 수심자료와 조석 경계장 효과 및 대기강제력에 대한 민감도 평가를 통해 매개변수의 최적화를 하여 RTSM_POM 모델 보다 좋은 결과가 나온 것으로 사료된다.

기존 RTSM_POM 모델에 비해 예측 성능이 개선되었지만, 8 km의 해상도로 남해와 서해같은 복잡한 연안지역 해일을 정확하게 예측하는데 한계성도 있을 것으로 생각된다. 이와 관련하여 1 km 수평해상도를 가지는 NEMO 기반 국지연안 폭풍해일예측시스템을 개발 중에 있으며, 향후 국지연안 모델을 이용하여 수치모델 격자와 입력 기상장의 해상도에 따른 연안지역에서의 폭풍해일 예측정확도에 대해서 추가적인 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 「해양기상감시 및 차세대 해양예측시스템 개발」(KMA2018-00420)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Becker, J.J. and Sandwell, D.T. (2006). SRTM30_PLUS: SRTM30, coastal & ridge multibeam, estimated topography. Electronic Journal.
- Brown, J.M. and Wolf, J. (2009). Coupled wave and surge modelling for the eastern Irish Sea and implications for model wind-stress. Continental Shelf Research, 29(10), 1329-1342.
- Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 81(350), 639-640.
- Egbert, G.D., Bennett, A.F. and Foreman, M.G.G. (1994). Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model. Journal of Geophysical Research, 99, 24821-24852.
- Egbert, G.D. and Erofeeva, S.Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19, 183-204.
- Goodwillie, A. (2003). User guide to the GEBCO one minute grid. Centenary edition of the GEBCO digital Atlas, GEBCO.
- Ku, H., Maeng, J.H. and Cho, K. (2019). Deterministic estimation of typhoon-induced surges and inundation on Korean coastal regions. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 31(1), 1-8.
- Kinsman, B. (1984). Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface. Courier Corporation.

- Madec, G. and the NEMO team. (2016). NEMO reference manual v3.6, Tech. Rep. 27 ISSN 1288-1619, Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL).
- Mastenbroek, C., Burgers, G. and Janssen, P.A.E.M. (1993). The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer. *Journal of Physical Oceanography*, 23(8), 1856-1866.
- Mellor, G.L. (1998). Users guide for a three dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Princeton, NJ: Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University.
- National Institute of Meteorological Research (2017). Development of Marine Meteorology Monitoring and Next-generation Ocean Forecasting System(IV). (in Korean).
- Soontiens, N., Allen, S., Latornell, D., Le Souef, K., Machuca, I., Paquin, J.-P., Lu, Y., Thompson, K. and Korabel, V. (2016). Storm surges in the Strait of Georgia simulated with a regional model. *Atmosphere Ocean*, 54(1), 1-21.
- You, S.H. and Seo, J.W. (2009). Numerical study of storm surges and tide around Korea using operational ocean model. *Marine Geodesy*, 32(2), 243-263.
- Wu, J. (1982). Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research*, 87(C12), 9704-9706.
- Williams, J.A. and Flather, R.A. (2000). Interfacing the operational storm surge model to a new mesoscale atmospheric model. POL internal document 127, Proudman Oceanographic Laboratory.

Received 11 September, 2020

1st Revised 19 October, 2020

2nd Revised 23 October, 2020

3rd Revised 30 October, 2020

Accepted 3 November, 2020