

HNS 확산 예측정확도 향상을 위한 황해 연안 조화상수 데이터베이스 격자해상도 개선

송승헌^{1,†} · 김다솜² · 오병철³ · 이문진⁴ · 김태성⁵

¹주해강기술 부설해양방재연구소 선임연구원

²주해강기술 부설해양방재연구소 연구원

³주해강기술 부설해양방재연구소 소장

⁴선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 영년직 책임연구원

⁵선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 선임연구원

Improving the Grid Resolution of the Tidal Harmonic Constants with Database on the Yellow Sea Coast to Enhance the Accuracy of Hazardous and Noxious Substance Diffusion Prediction

Seunghoon Song^{1,†}, Dasom Kim², Byungcheol Oh³, Moonjin Lee⁴, and Tae-Sung Kim⁵

¹Senior Researcher, Affiliated Marine Disaster Prevention Laboratory, Sea&River Technology Inc., Gunpo 15847, Korea

²Researcher, Affiliated Marine Disaster Prevention Laboratory, Sea&River Technology Inc., Gunpo 15847, Korea

³Director, Affiliated Marine Disaster Prevention Laboratory, Sea&River Technology Inc., Gunpo 15847, Korea

⁴Tenured Principal Researcher, Maritime Safety and Environmental Research Division,

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

⁵Senior Researcher, Maritime Safety and Environmental Research Division,

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

해양에서의 HNS 사고대응을 위한 예측 체계는 DB를 이용한 신속 조류 예측이 주를 이룬다. 조화상수 DB의 해상도는 DB 구축에 사용된 수치모델의 격자해상도에 크게 의존하고 있으며, 동북아 영역과 한반도 인근에서의 격자해상도는 신속 예측을 위해 계산시간을 고려하여 3분, 1분 격자로 구성되었다. 격자 크기가 황해의 복잡한 해안선을 정확하게 재현하기 어렵기 때문에, 연안 인근의 사고를 재현할 때 DB를 기반으로 한 입자추적모델의 정확도가 감소하는 문제가 발생하였다. 황해를 세 지역으로 나누어 0.5 km 간격으로 내삽하고, 수치모델을 다시 수행하여 조류를 광역 결과와 비교하였다. 동방 유속성분과 북방 유속성분을 분리하여 광역 모델(L1)과 내삽 격자(D1, D2, D3)를 비교한 결과 영흥도(D1, 20LTC04)와 평택(D1, 19LTC01), 개야도(D2, 17GS03)는 각 성분의 b값이 0.3 이상 크게 개선되었다. D3 영역은 광역 결과에서 동방 유속성분 예측값이 관측값에 비해 과도하게 크게 산정되었으나, 내삽 이후 관측값과 유사하게 예측하도록 개선되었으며 조류 조화상수 연안 인근 정확도가 증가한 것을 알 수 있었다.

Abstract – As for the prediction system for responding to HNS spill accidents in the ocean, rapid current prediction using Database (DB) is mainly. The resolution of the harmonic constants DB largely depends on the grid resolution of the numerical model used to construct the database. The model grid size in Large area (Northeast Asia) is difficult to accurately reproduce the complex coastline of the Yellow Sea, when reproducing accidents near the coast, the accuracy of the particle tracking model based on the existing DB is incorrect. The Yellow Sea was divided into three regions, grids made by 0.5 km intervals, modeling was performed again, and the tidal currents were verified by comparing them with the existing results. As a result of comparing the wide area grid (L1) and the nesting grid (D1, D2, D3) by separating the eastern and northern current components, Yeongheungdo (D1, 20LTC04), Pyeongtaek (D1, 19LTC01), and Gaeyado (D2, 17GS03) were b values of each component were significantly improved by 0.3 or more. In the D3 area, the predicted value of the eastern flow component was calculated to be

[†]Corresponding author: chobo4616@naver.com

excessively large compared to the observed value, but it was improved to predict similarly, was found that the accuracy of the tidal harmonic constant near the coast increased after nesting.

Keywords: Tidal current prediction(조류 예측), Harmonic constants database(조화상수 데이터베이스), Numerical model(수치모델), Nesting(내삽)

1. 서 론

해양에서 선박 사고로 인한 유류 및 위험유해물질(Hazardous and Noxious Substance; HNS)의 유출은 세계 경제의 발전과 화학공업의 발달에 따라 증가하였다. 최근 한국은 석유제품의 수출입 비중이 지속해서 증가하는 추세로, 선박을 통한 해상 운송량이 많이 증가하고 있는 상황이며, 이에 따른 크고 작은 해양 사고가 발생하고 있다. 해양오염사고 발생 건수는 최근 10년간(2011-2020) 연평균 263건 발생했으며, 554 kl/yr가 유출되었다. 2021년에는 247건의 해양 유출 사고 중 312.8 kl의 유출이 발생하였는데 전년 대비 유출량은 59.4% 감소하였으나, 화물선·유조선의 오염사고 사례는 전년 대비 41% 증가하였다(Korea Coast Guard[2022]). 해상 운송 중 사고 발생 시 막대한 피해가 예상되는 HNS 유출 사고 사례가 증가함에 따라 HNS의 확산 범위를 보다 신속하고 정확하게 예측하고 사고 현장에 지시하는 시간을 단축할 방안에 관한 연구가 지속해서 수행되었다. Doodson[1921]에서 제시한 1900년 1월 1일 00시를 기준으로 하여 경과된 시간의 함수로 계산한 방식을 기본으로 한 조석예보 모델을 적용하여 실시간 유출유 확산 모델링을 진행한 바 있으며(Jung[1999]), 유류오염 확산예측을 위한 표면류 예측을 위해 수치모델 결과와 검조소 관측 결과를 결합하여 일주조와 반일주조의 조화반응(Harmonic response)을 계산한 CHARRY(Current by Harmonic Response to the Reference Yardstick)모델을 이용하여 조류 예측을 실시간으로 수행한 사례가 있다(Lee and Kang[2015]). 실시간 예측을 위해서는 기본적으로 격자별 조화상수 값이 필요로 하며, 해당 격자형 정보의 정확성 개선을 위해서는 수치모델의 격자가 주변 해역 및 해안선을 자세하게 표현할 수 있어야 한다. 하지만 수치모델의 격자를 자세하고 상세히 할수록 신속 예측 개념과는 반비례되는 것으로 실시간 사고 예측을 위한 시스템 구축에 많은 제약이 있다. ROMS(Regional Ocean Modeling System)이나 MOHID(MOdelo HIDrodinâmico) 등과 같은 3차원 순환 모델의 경우 많은 자원을 필요로 하고 모델 수행을 위한 시간이 사고대응에는 적합하지 못하며, 연안 예측 모델인 Delft3D, EFDC의 경우도 모의에 더 많은 시간이 필요하다(Son *et al.*[2017]). 제약사항에 따른 문제로 인해 동북아 조류 예측 모델은 3분과 1분 간격의 격자를 기반으로 데이터베이스를 구축하였으나, 복잡한 연안 지형, 조간대 영역 등 격자 크기보다 작은 규모에서 조류의 예측정확도가 현저히 떨어졌다. 이러한 문제는 사고 예측 모델인 입자추적모델의 연안 인근 해양사고 재현성을 감소시키므로 HNS 사고 예측 모델의 정확도 개선을 위해서는 데이터베이스의 기본이 되는 조류 모델의 격자해상도를 증가시켜야 한다. 과거에는 컴퓨팅 능력의 한계로 인해 넓은 영역에 대한 상세한 격자 재현은 불가능하였

나, 최근 발전된 기술로 인해 이러한 제약이 다소 해소되었다(National Research Foundation of Korea[2021]). 현재 조류 DB의 해상도인 동북아 광역 모델은 황해 연안 인근에서 정확도가 떨어지므로 정확도 개선을 위해 격자를 상세히 재구성하고, 황해 인근에서의 예측 모델의 정확도를 개선하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 광역 모델 한계 분석

동북아 인근 조화상수 Database 구축 목적으로 2018년을 기준으로 우리나라를 중심으로 한 동북아(25°N~55°N, 117°E~150°E) 3분(약 5.4 km) 간격, 한반도 인근(31°N~43°N, 122°E~133°E) 1분(약 1.8 km) 간격으로 Fig. 1과 같이 조류 예측을 수행하였다.

수치모델 경계 설정을 위해 Nao.99Jb(National Astronomical Observatory of Japan) 일본 인근 해역 조류 조화상수 모델 데이터를 사용하였다. Nao.99b 및 Nao.99Jb 모델은 TOPEX/POSEIDON의 고도계 데이터를 이용하여 전 지구 및 일본 지역 조류를 약 5년간 수치모델링 하여 만든 조화상수 데이터베이스로 격자별(1/2도, 5분)로 데이터를 읽을 수 있으며, 16가지 분조(M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1, M1, J1, OO1, 2N2, Mu2, Nu2, L2, T2)에 대해서 사용할 수 있다(Matsumoto *et al.*[2000]). 조류 예측을 위해 MOHID 모델을 400일간 수행하였다. MOHID 모델은 삼차원 비압축성유체에 대한 방정식을 계산하며, 정수압은 Boussinesq와 Reynolds 근사를 가정하고, 직교 좌표계에서 모델의 x, y, z 방향의 운동방정식, 연속방정식, 정수압 방정식은 각각 다음 식과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \partial_t u = & -\partial_x(uu) + \partial_y(uv) + \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho} \partial_x p \\ & + \partial_x((v_H + v)\partial_x u) + \partial_y((v_H + v)\partial_y u) + \partial_z((v_t + v)\partial_z u) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial_t v = & -\partial_x(vu) + \partial_y(vv) + \partial_z(vw) + fu - \frac{1}{\rho} \partial_y p \\ & + \partial_x((v_H + v)\partial_x v) + \partial_y((v_H + v)\partial_y v) + \partial_z((v_t + v)\partial_z v) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (3)$$

$$\partial_z p + g\rho = 0 \quad (4)$$

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도 벡터 성분, f 는 코리올리 파라미터, v_H, v_t 는 수평/수직 방향에서의 난류 점성(turbulence viscosity), ν 는 분자 동점성 계수(molecular kinematic viscosity), p 는 압력, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도이다. 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 운동량 및 물질이동 항은 1-2-3차 오더의 전방차분법, 중앙차분법, TVD(Total Variation Diminishing) 방법을 적용하였다. 조류 단일 조건에서 모델을 구성하고 다른 변수에 의한 변화를 통

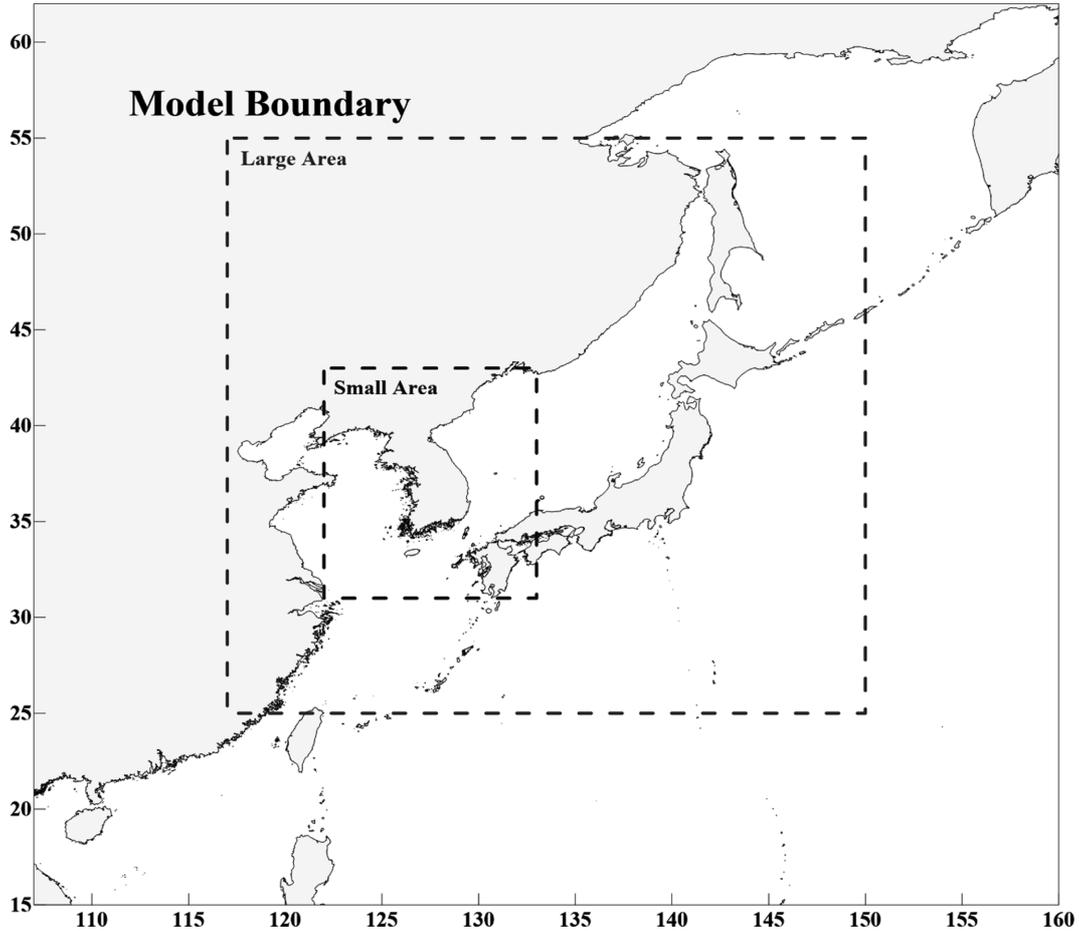


Fig. 1. Wide-area tidal current prediction model boundary in Northeast Asia.

제하기 위해 수온, 염분값은 상온 및 30 psu에서 변하지 않도록 고정했으며, ρ 값은 수온과 염분에 의해 초기 지정한 값에 의해 고정된다. 연직경계조건의 경우 표층에서의 플릭스 및 응력은 0으로 가정하였고, 저층에서는 해저면과 수층의 전단응력은 다음 식과 같이 결정하여 사용하였다.

$$v \frac{\partial \vec{v}_H}{\partial z} \Big|_{bottom} = C_D \vec{v}_H |\vec{v}_H|, C_D = \left(\frac{k}{\log \left(\frac{z+z_0^b}{z_0^b} \right)} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, C_D 은 유체-저면의 항력 계수, k 는 von Karman 상수, z_0^b 는 Bottom roughness length이다. z_0^b 의 경우 저층에 인접한 격자에서 발생하는 유속과 전체 격자의 수심에 따라서 결정된다. z_0^b 는 Bottom absolute rugosity(이하 rugosity)로 제어되며, rugosity의 초기 설정값(Default)은 0.0025 m이다. 경계조건 설정 이후 초기 설정값으로(Default) 검증실험 시 경기만 인근에서 M2, S2 분조의 진폭이 관측값에 비해 낮게 모의되고, 태안 기준 북측 해상으로 올라갈수록 S2 분조의 진폭/위상 오차가 증가하는 경향이 나타나 마찰계수를 조정할 필요가 있었다. rugosity값의 모형 반응을 알아보기 위해 인천항에서 0.0025 m, 0.0015 m, 0.0010 m, 0.0005 m 4개 조건으로

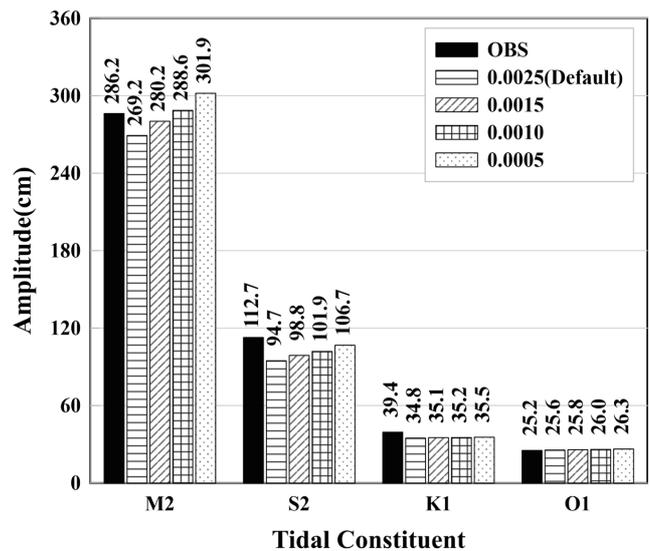


Fig. 2. Comparison of tide amplitude change in Incheon Port through friction coefficient adjustment.

비교실험을 진행하였는데, 동북아 해역을 기준으로 rugosity값이 감소할수록 진폭이 증가하는 효과를 보였으며, 마찰계수가 0.0010 m

Table 1. Amplitudes and phase of Major tidal components and Observation-Model (Northeast Asia Area) for T1-T10 Stations

St.	Tidal components					St.	Tidal components				
	name	amplitude (cm)		phase (°, g)			name	amplitude (cm)		phase (°, g)	
		OBS	MOD	OBS	MOD			OBS	MOD	OBS	MOD
T1	M2	286.2	288.6	137.2	162.1	T6	M2	6.1	4.7	88.8	72.2
	S2	112.7	101.9	195.9	217.7		S2	2	1.4	116.4	121.2
	K1	39.4	35.2	304.1	314.1		K1	4.6	4.9	1.4	346.0
	O1	25.2	26.1	265.3	280.3		O1	4.4	5.0	319.5	314.6
T2	M2	220.1	227.4	89.8	91.6	T7	M2	69.7	76.6	311.3	310.6
	S2	81.6	82.4	143.1	139.0		S2	29.5	29.8	341.0	337.3
	K1	34.4	31.7	280.7	278.4		K1	23	22.7	219.0	216.5
	O1	26.2	23.7	246.8	246.8		O1	16.8	16.9	188.1	190.1
T3	M2	101.2	108.5	259.2	261.5	T8	M2	75.7	83.3	281.8	278.9
	S2	47.4	48.2	297.2	292.7		S2	33.7	34.9	310.8	308.4
	K1	20.2	18.5	198.3	182.0		K1	24.5	24.4	209.6	205.3
	O1	12.2	13.0	150.3	153.6		O1	17.7	18.5	176.0	178.6
T4	M2	54.4	60.7	243.8	244.9	T9	M2	79.9	80.8	8.7	357.0
	S2	25.7	27.9	280.2	276.1		S2	27.3	28.3	45.5	29.1
	K1	7.8	7.4	162.5	160.3		K1	19.7	20.4	238.8	231.5
	O1	4.3	4.2	129.8	127.7		O1	15.6	15.2	207.5	205.4
T5	M2	3.1	1.7	122.7	108.9	T10	M2	4.5	4.7	57.8	53.1
	S2	0.7	0.9	178.5	208.9		S2	1.5	1.2	78.6	89.4
	K1	4.2	4.3	9.2	349.7		K1	4.8	5.1	349.4	339.5
	O1	4.3	4.6	321.8	317.8		O1	4.7	5.2	310.9	309.3

Table 2. Amplitudes and phase of Major tidal current components and Observation-Model (Northeast Asia Area) for C1-C5 Stations

St.	Tidal components					St.	Tidal components				
	name	amplitude (cm/s)		phase (°, g)			name	amplitude (cm/s)		phase (°, g)	
		OBS	MOD	OBS	MOD			OBS	MOD	OBS	MOD
C1, u	M2	27.5	21.5	352.6	352.3	C1, v	M2	76.2	72.0	155.9	154.2
	S2	7.5	7.6	43.0	19.1		S2	23.2	24.4	210.0	176.0
	K1	3.0	1.1	152.2	95.0		K1	5.7	8.5	290.0	244.3
	O1	2.1	1.1	106.1	87.1		O1	5.7	5.7	240.7	244.8
C2, u	M2	82.4	78.4	43.7	61.2	C2, v	M2	56.0	61.2	77.1	79.3
	S2	26.4	30.1	98.9	88.1		S2	21.8	23.3	132.0	103.3
	K1	5.7	6.4	205.0	211.8		K1	5.2	6.2	241.3	214.9
	O1	2.7	4.5	165.6	202.4		O1	4.4	4.4	192.8	209.5
C3, u	M2	30.3	32.8	40.2	22.3	C3, v	M2	46.1	43.7	55.1	53.6
	S2	13.9	12.4	66.0	45.9		S2	23.3	16.8	76.2	71.4
	K1	5.9	3.8	240.0	207.6		K1	10.1	9.3	233.1	223.6
	O1	2.0	2.8	196.3	202.6		O1	5.2	6.6	189.4	217.8
C4, u	M2	39.1	45.8	146.3	136.9	C4, v	M2	63.5	79.8	354.6	346.4
	S2	21.3	18.4	193.1	151.1		S2	29.0	30.5	54.2	1.7
	K1	13.6	10.0	341.8	352.4		K1	29.4	18.6	234.8	205.0
	O1	7.9	8.1	308.8	348.5		O1	19.4	14.6	189.9	201.4
C5, u	M2	36.7	34.2	69.6	41.1	C5, v	M2	9.3	4.2	185.8	158.1
	S2	14.6	13.7	123.7	52.9		S2	4.9	2.3	222.3	168.5
	K1	13.7	7.9	314.7	255.3		K1	2.5	1.2	257.9	226.9
	O1	12.3	6.2	278.8	251.8		O1	1.2	1.1	218.3	226.7

일 경우 최적의 결과를 나타냈다(Fig. 2).

수치모델은 기간을 1년 이상 수행하고 조화분해를 실시하였다.

조위 검증은 국립해양조사원 기본수준점 4대분조(M2, S2, K1, O1)

자료를 이용하였으며, 인천항(T1), 군산항(T2), 여수항(T3), 부산신

항(T4), 포항항(T5), 동해항(T6), 제주항(T7), 서귀포항(T8), 가거도(T9), 독도(T10) 총 10곳에서 진행하였다. 조류 검증은 국립해양조사원 과거 관측자료 중 백령도-대청도 인근 해상(C1; 12BY01), 연평도 남동쪽 30 km 해상(C2; 07GG12), 어청도 남서쪽 30 km 해상(C3; 00KS-3), 맹골도 인근 해상(C4; 06YME7), 여수 인근 해상(C5; 06YS10) 총 5곳에서 진행하였다. 조위의 경우 Table 1과 같이 분조별 오차는 동해를 제외한 지점에서 최대 약 10% 내외로 나타났으며, 동해항, 포항항, 독도의 경우 관측값의 진폭이 작아 비교적 오차율이 크게 나타났으나, 정점별로 1.4 cm, 1.4 cm, 0.5 cm 이내의 오차를 보여 큰 차이가 없는 것으로 판단하였다. 조류의 경우 동방성분과 북방성분으로 u, v 방향을 분리하여 분석하였으며, Table 2와 같이 결과를 산출하였다. 조류의 경우 C5를 제외한 4곳에서 진폭 함에 대한 오차는 20% 이내이나, C5의 북방성분의 오차는 51.5%로 크게 나타났다. 격자 크기 및 모양에 따른 수치모델 결과를 비교한 연구사례를 보면 격자가 조밀하지 않을수록 저면 마찰과 Numerical viscosity의 증가를 초래하였으며, 유속 및 수위를 변화시키는 중요한 변수로 작용하였다(Bomers *et al.*[2019]). 관측 위치 인근의 지형과 섬을 실험 격자로 재현하지 못하여 오차가 크게 발생한 것으로 판단된다.

2.2 황해 연안 상세역 구축

동북아 광역 모델에서 외해에서의 조류 예측정확도는 높게 나타났으나, 연안 인근의 조류관측점에서의 정확도는 크게 저하되었다. 조위의 경우 연안 인근 격자해상도가 높지 않아도 Fig. 2 인천항 사례와 같이 예측정확도가 높을 수 있으나, 황해의 많은 조건대 지역과 섬들로 인해 조류에 대한 3분, 1분 격자에서의 정확한 예측은 사실상 불가능하다. 이에 따라 연안 인근에서의 격자해상도를 증가하기 위해 경기만, 태안, 새만금 인근 해역에 대한 0.5 km 간격의 정밀한 조류 예측이 필요하다고 판단하였다. 연안 인근에서의 예측을 위해 광역 모델과 연계하여 내삽(Nesting)을 실시하였으며, 격자 크기는 0.5 km 간격으로 구성하였다. 원활한 실험을 위해 경기만, 태안, 새만금 해역을 분리하였으며, 각각 D1, D2, D3 영역으로 정하였다. 동북아 영역 모델에서 해안선이 부정확했던 경기만 연안 지역과 평택항 인근의 경우 격자해상도가 증가함에 따라 조건대 지역과 한강 하구, 인천 신항, 평택항 등을 정확하게 재현할 수 있었다(Fig. 3). D2 영역은 태안부터 비응항까지 포함하였으며, D3 영역은 비응항부터 낙월도까지 설정하여 연안 인근 조건대 및 하구역에 대해 재현토록 하였다. 모델 수심은 광역과 상세역 모두 2021년에 발간된 수치해도를 기준으로 적용하였다.

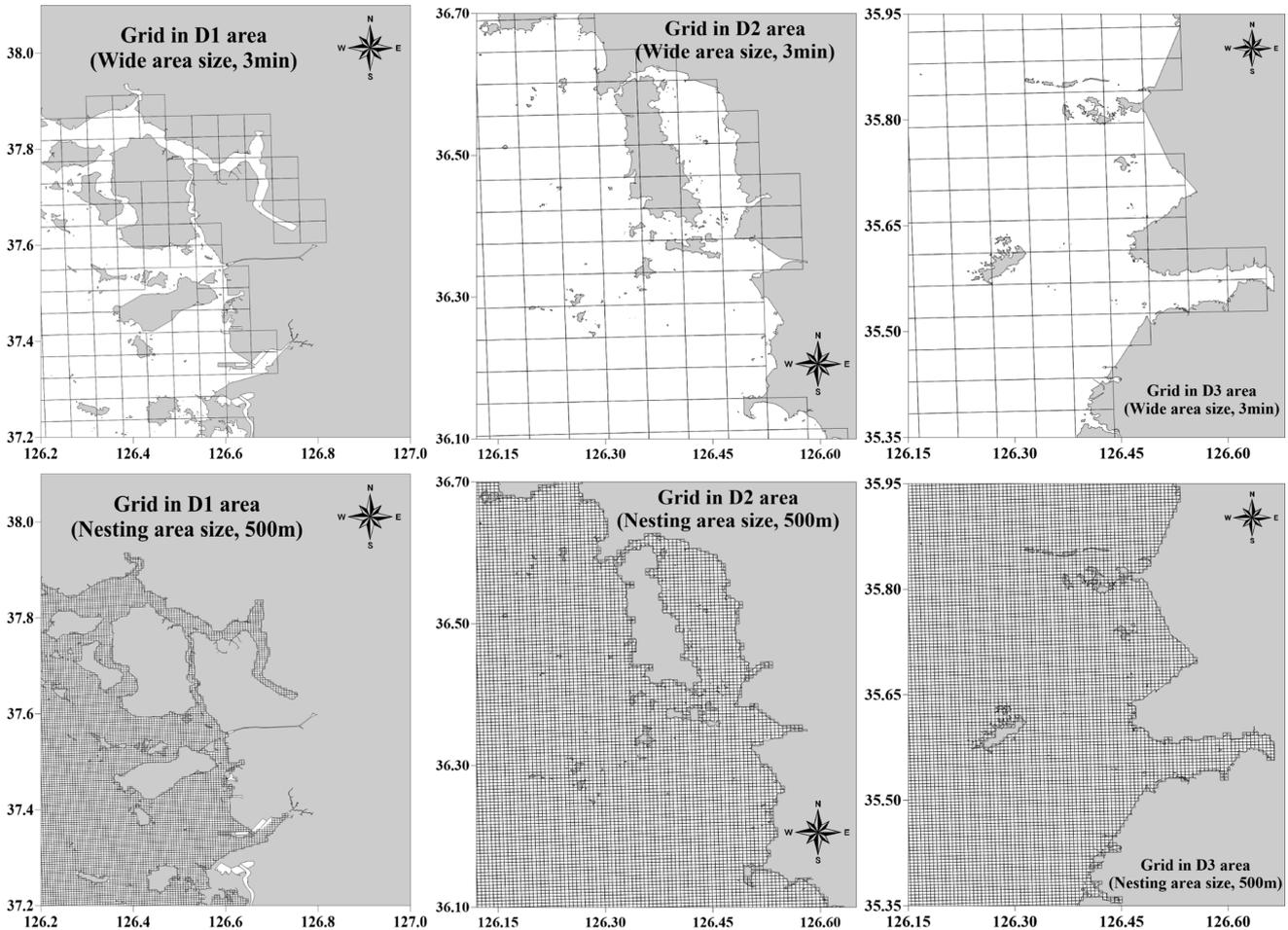


Fig. 3. Comparison of shoreline resolutions between wide-area grids and nesting grids (D1, D2, D3).

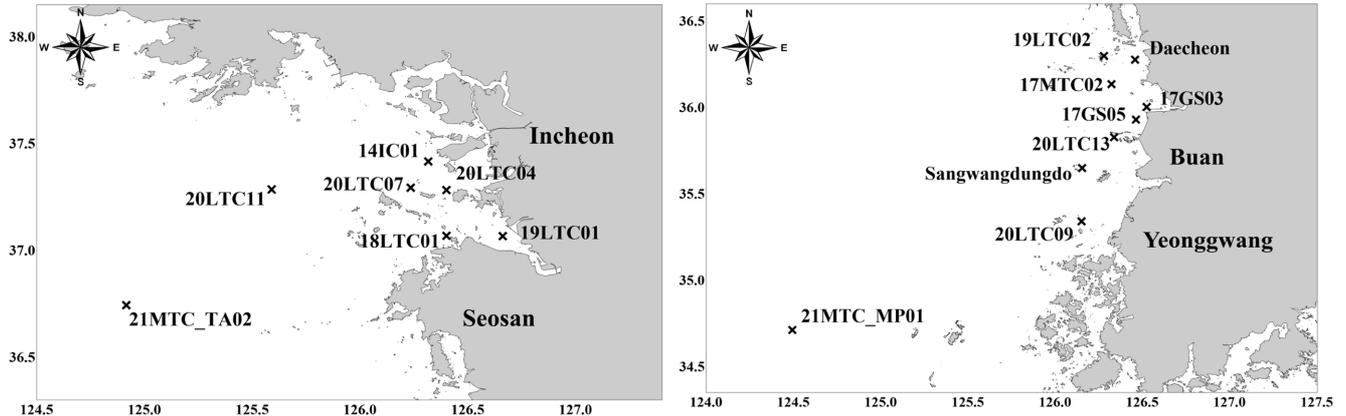


Fig. 4. The location of the observed tidal current data used to compare the model results.

Table 3. Sampling location and observed duration used for harmonic analysis. The Large components are indicated except for the four major substances (M2, S2, K1, O1) in South Korea

Area	Sample name (KHOA)	Longitude (°)	Latitude (°)	Observed duration (year.month.day.)	Specific Harmonic Constituents
L1	20LTC04	126.4067	37.2797	2020.04.09.-10.09.	N2, K2, L2
	20LTC11	125.6000	37.2844	2020.04.08.-10.12.	N2, MU2, L2, K2
	21MTC_TA02	124.9275	36.7417	2021.10.01.-10.31.	N2, J1, NO1
	21MTC_MP01	124.5000	34.7167	2021.08.01.-08.31.	N2, OO1, J1, Q1
D1	20LTC07	126.2469	37.2936	2020.04.09.-10.09.	N2, K2, L2, MU2
	18LTC01	126.4056	37.0742	2018.03.28.-10.05.	N2, L2, MU2, K2
	14IC01	126.3241	37.4253	2014.08.28.-09.26.	N2, OO1
	19LTC01	126.6600	37.0739	2019.03.19.-09.18.	N2, L2, K2
D2	Daecheon	126.4578	36.2741	2021.01.01.-12.31.	N2, K2
	19LTC02	126.2092	36.2442	2019.03.20.-09.19.	N2, K2, P1, L2
	17MTC02	126.3286	36.1428	2017.09.23.-10.22.	N2, NO1, Q1
	17GS03	126.5303	36.0108	2017.08.28.-09.29.	N2, MU2, L2
D3	20LTC13	126.3508	35.8303	2020.04.17.-10.17.	N2, K2, P1, L2
	20LTC09	126.1667	35.3500	2020.04.09.-10.09.	N2, L2, MU2, Q1
	Sangwangdungdo	126.1943	35.6525	2020.01.01.-12.31.	N2, K2, P1, MU2
	17GS05	126.4650	35.9386	2017.08.28.-09.29.	N2, OO1, MU2

2.3 상관관계 및 오차 분석

조류 예측 결과의 정확도 향상 정도를 파악하기 위해 모델 결과를 검증하였다. 국립해양조사원의 과거 관측자료와 해양관측부이 유속 관측자료 중 지역별 우세 분조 및 천해분조를 포함하기 위해 국립해양조사원에서 제공하는 30주야 이상의 관측자료를 사용하였다. 조화분해는 Nao.99Jb 16개 분조를 기준으로 Rayleigh Criterion (Godin[1972])에 따라 분조마다 주기 차이에 따른 분석이 가능한 최단기간을 검토하여 실시하였다. 동북아 광역 모델(L1)에서 4개 정점, L1-D1 비교 4개 정점, L1-D2 비교 4개 정점, L1-D3 비교 4개 정점 총 16개 정점(Fig. 4)에 대해 조화분해 후 모델 결과의 검증을 수행하고 광역 실험 결과와 내삽된 상세역 실험 결과를 비교하였다(Table 3).

검증 결과는 동일 기간 관측 결과와 모델 결과의 조화상수를 이용하여 조류 예측을 수행하였을 때 두 자료의 동방성분과 북방성분의 예측 시계열의 오차를 파악하기 위해 선형회귀를 이용하여 기울기를 파악하였다(Pak and Oh[2010]; Rose and Bhaskaran[2015];

Jeong and Park[2020]). 상관관계(Correlation;R) 및 기울기(slope;b)의 값이 1에 가까울수록 모델 결과의 조화상수가 실제 해역의 흐름을 정확히 재현했다고 판단하였으며, 기울기의 값이 0.7 이하, 1.3 이상일 경우 개선되지 않은 것으로 판단하였다.

3. 실험 결과

3.1 조류 검증 결과 비교

L1 영역은 D1, D2, D3 영역을 모두 포함하나 외해 측 해역에서는 비교할 수 없으므로 분리하여 별도로 모델 정확도를 평가하였으며, 관측값과 모델 예측값을 비교했을 때 연안에 체일 가까운 정점인 20LTC04 정점 결과에서 오차가 크게 발생하였다(Fig. 5). D1 영역은 14IC01에서 상관관계가 0.8 이상으로 나타났지만, 동방 유속성분의 기울기가 0.567로 낮게 나타났다(Fig. 6, D1). D2 영역에서는 대천해수욕장 인근 해양관측부이 동방 유속성분의 기울기가 0.698로 D2 영역에서 가장 부정확하게 예측되었다. 17GS03에서는 북방 유속성

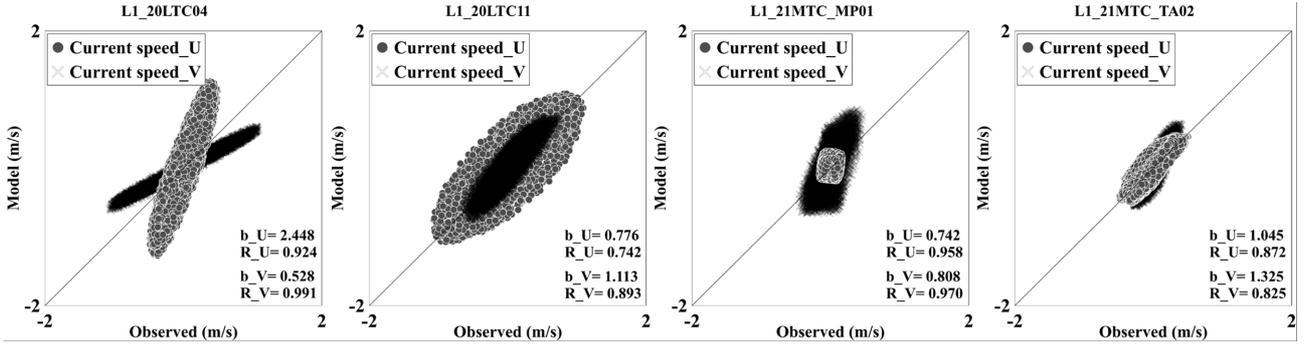


Fig. 5. Results of linear regression analysis according to tidal current verification with observation values for the L1 modeling areas.

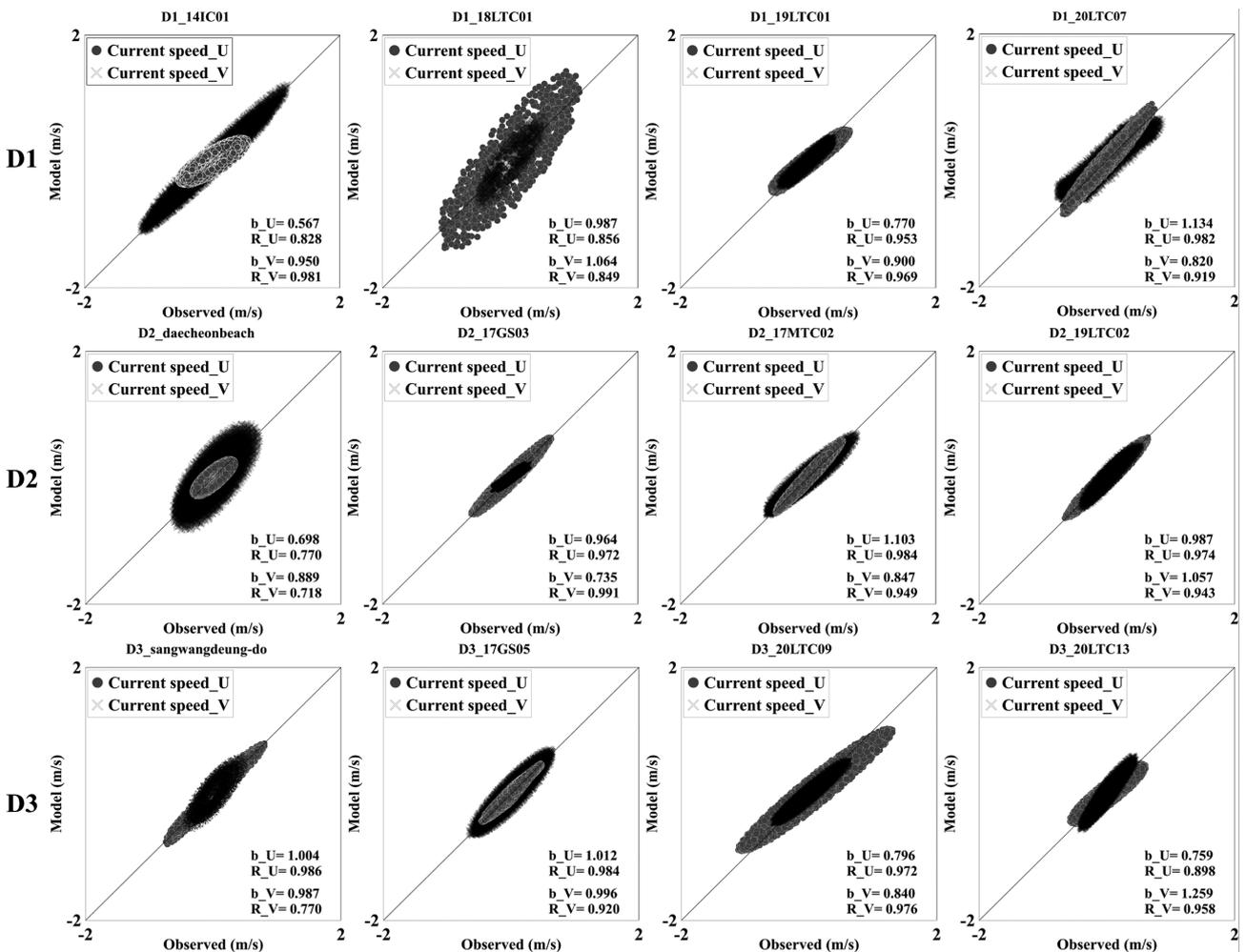


Fig. 6. Results of linear regression analysis according to tidal current verification with observation values for the D1, D2, and D3 modeling areas.

분의 기울기가 0.735로 관측 북방유속의 크기가 0.5 m/s 이하로 작아 상대오차가 커진 것으로 판단된다(Fig. 6, D2). D3 해역의 17GS05에서는 b , R 값이 1에 가까워 모델 예측값이 관측값을 잘 재현한 것으로 보였지만, 20LTC13의 경우 동방 유속성분과 북방 유속성분의 기울기가 0.759, 1.259로 나타났는데 해당 위치의 경우 섬이 다수 존재하고 지형이 복잡하여 내삽 격자에서도 재현이 미

흡한 것으로 판단된다(Fig. 6, D3).

3.2 격자해상도 향상에 따른 조류 정확도 개선

동북아 광역 모델 기반의 DB 예측정확도 대비 0.5km로 격자해상도가 개선됨에 따라 실제 연안 인근 예측 결과의 수치상 개선 효과를 보고자 하였다. 이에 따라 L1-D1 20LTC04, L1-D1 19LTC01,

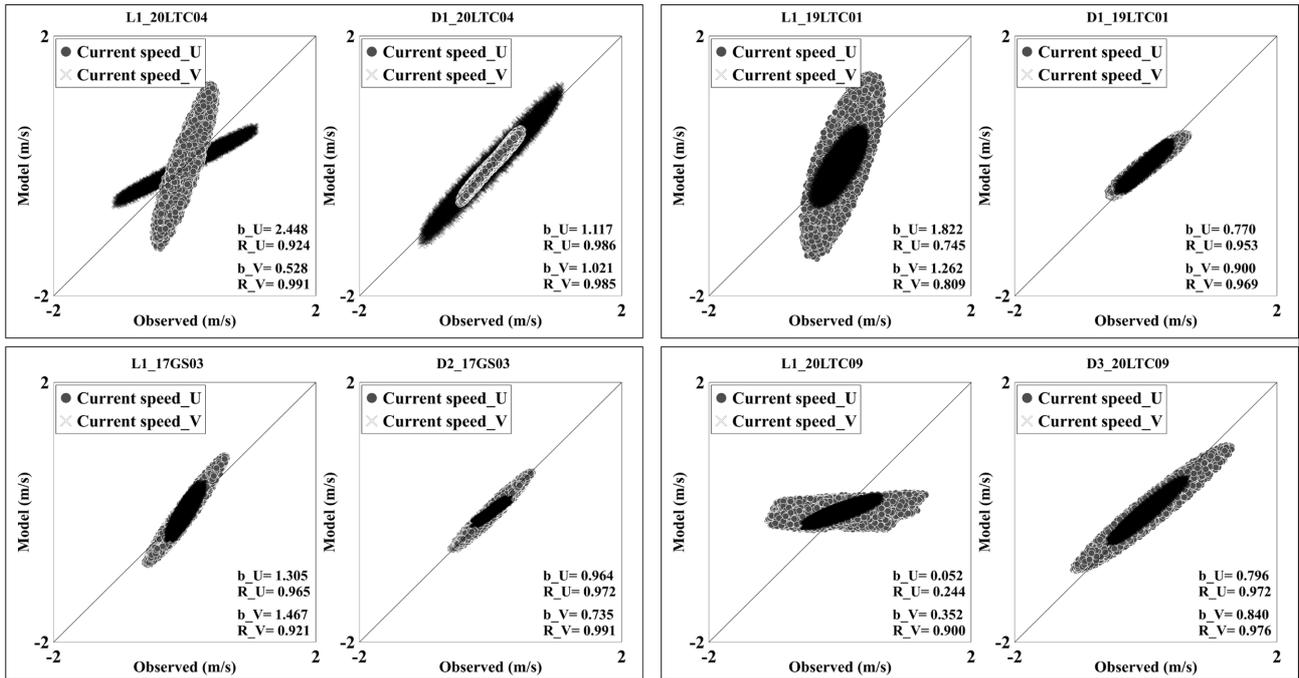


Fig. 7. Comparison of tidal current verification results in the existing L1 grid and the D1, D2, and D3 grids.

Table 4. Comparison of correlation coefficients (R) and slope (b) values using harmonic constituents-based modeling predictions (2021's) of Wide (L1)-Nesting (D1, D2, D3) grids at KHOA observed locations

Data		141C01		20LTC07		20LTC04		18LTC01		19LTC01	
		L1	D1	L1	D1	L1	D1	L1	D1	L1	D1
b	u	0.338	0.567	1.589	1.134	2.448	1.117	1.021	0.987	1.822	0.770
	v	0.475	0.950	0.718	0.820	0.528	1.021	1.047	1.064	1.262	0.900
R	u	0.993	0.828	0.957	0.982	0.924	0.986	0.698	0.856	0.745	0.953
	v	0.975	0.981	0.922	0.919	0.991	0.985	0.703	0.849	0.809	0.969
Data		Daecheon		19LTC02		17MTC02		17GS03			
		L1	D2	L1	D2	L1	D2	L1	D2		
b	u	0.823	0.698	0.648	0.987	0.933	1.103	1.305	0.964		
	v	0.648	0.889	1.260	1.057	0.762	0.847	1.467	0.735		
R	u	0.798	0.770	0.979	0.974	0.887	0.984	0.965	0.972		
	v	0.617	0.718	0.940	0.943	0.909	0.949	0.921	0.991		
Data		17GS05		20LTC13		Sangwangdungdo		20LTC09			
		L1	D3	L1	D3	L1	D3	L1	D3		
b	u	0.940	1.012	0.305	0.759	0.720	1.004	0.052	0.796		
	v	0.250	0.996	1.513	1.259	1.182	0.987	0.352	0.840		
R	u	0.987	0.984	0.879	0.898	0.947	0.986	0.244	0.972		
	v	0.929	0.920	0.977	0.958	0.803	0.770	0.900	0.976		

L1-D2 17GS03, L1-D3 20LTC09 각 영역 검증 지점을 광역 검증 결과와 비교하였다. Fig. 7의 L1-D1 20LTC04와 19LTC01 비교 결과를 보면 동방 유속성분이 모델에서 관측값보다 크게 예측되는 문제가 L1 영역에서 있었지만, D1의 결과에서는 동방 유속성분이 감소하였다. D1 영역에서 L1 영역보다 관측값에 대한 지각 오차가 감소함에 따라 b값의 경우 20LTC04 정점에서 동방 유속성분과 북방 유속성분 모두 2.448→1.117, 0.528→1.021로 크게 개선됨을 확인하였다. L1-D1 19LTC01의 경우에도 기울기가 각각 1.822→0.770,

1.262→0.900으로 L1에 비해 D1에서 크게 개선되었다.

L1-D2 17GS03의 경우 b값이 1보다 크게 분포하였으나, D2 영역에서 관측값과 유사하게 감소하여 기울기가 0.964, 0.735로 나타났다. L1-D3 20LTC09의 경우는 내삽에 의해 예측정확도가 크게 개선되었다. Fig. 7과 Table 4를 확인해보면 대체로 연안 인근 해안선이 복잡한 경우 기울기 및 상관관계가 1에 근접하게 개선되었음을 알 수 있었다. 이는 내삽된 격자를 이용함에 따라 연안역 인근의 바닥마찰계수와 연직확산계수가 광역과 달리 적용되어 실제

해양환경과 유사해진 것이 1차적인 요인으로 판단되며, 이는 단순히 격자 크기 개선에 따른 결과이기보다는 내삽을 이용한 메커니즘에서 기술적으로 수십별로 다른 마찰계수를 적용할 수 있게 되어 관측값과 유사해진 것이라고 보인다. 과거 연구사례 및 결과를 통해 분석한 Suh[2011] 사례를 살펴보면 천해분조 및 천해역 상세화를 이용하여 예측치의 정확도를 개선하고자 하였다. 연안역에 대해서는 다른 확산계수와 연직확산계수를 적용하여 천해분조의 재연성과 정확도를 증가시켰는데, 연안역 인근 범위에 대해 내삽함에 따라 격자해상도가 증가하였으며 이때 예측모델의 변수를 지역별로 추가한 것과 같은 효과를 거둔 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 신속하고 정확한 HNS 사고 예측을 위해 확산모델에 적용하였던 3분, 1분 예측 모델의 조화상수 데이터베이스를 0.5 km 간격으로 황해 연안을 업데이트하여 DB의 예측정확도를 향상하고자 하였다. 조류 예측 모델링은 격자가 상세하고 정밀해질수록 실제 예측을 위해 많은 시간이 필요하며, 이에 따른 기회비용도 상승한다. 사고 예측을 위한 입자추적모델의 기본적인 예측정확도는 유동장을 구성하는 조류, 해류, 취송류 등 각각의 유동모델 결과에 따라 크게 좌우되고, 황해의 경우 조류의 영향력이 매우 크기 때문에 조류 데이터베이스의 격자 정밀도 향상이 매우 중요하게 작용한다. 황해 연안의 DB기반 예측정확도를 개선하기 위해 상세역 격자에 대한 수치모델을 구축하였으며, 관측값과 예측모델의 조류 검증을 실시한 결과 내부 13개 정점 중 11개 정점에서 10% 이상 개선 효과를 볼 수 있었다. 경기만의 복잡한 지형으로 인해 동방 유속이 정확하게 재현되지 않았던 부분이 크게 해소되었으나, 섬이 다수 존재하는 관측 지점이나(20LTC13) 연안에 매우 인접한 대천해수욕장 해양관측부이의 경우 크게 개선되지 않았다.

조화상수 DB를 상세히 구축하기 위해서는 많은 시간과 비용이 발생하여 그동안 고해상도의 넓은 영역에 대한 DB 구축은 어려웠으나, 최근 하드웨어 성능 및 예측에 필요한 소프트웨어가 발전하여 수치모델 계산시간이 점차 감소하고 이를 이용하는 사고대응/예측 시스템의 기회비용이 감소하였다. DB는 구축 이후 유동 예측을 위한 지속적인 기회비용이 발생하지 않으므로, 추가적인 업데이트를 통해 사고 빈번 지역 및 우심지역을 설정하여 복잡한 해안선을 가진 환경에서의 격자해상도를 현 0.5 km 수준에서 0.1 km, 0.05 km 급의 격자를 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 해안선을 정확히 표현할 수 있을 정도의 격자해상도 증가는 사고 발생 지점의 세밀한 표현이 가능케 할 것으로 보이며, 선박에서의 HNS 사고 예측 또한 지금보다 정확하게 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20150340, 위험·유해물질(HNS)

사고 관리기술개발, 20210660, 해양산업시설 배출 위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발).

References

- [1] Bomers, A., Schielen, R.M.J. and Hulscher, S.J.M.H., 2019, The influence of grid shape and grid size on hydraulic river modeling performance, *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 1273-1294.
- [2] Doodson, A.T., 1921, The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential, *Philos. Transaction Royal Soc. London*, A, 100, 305-329.
- [3] Godin, G., 1972, *The Analysis of Tides*, 1st ed., University of Toronto Press, Canada.
- [4] Jeong, S.M. and Park, I.H., 2020, Characteristics of Tidal Flow Simulation of Real Tide in West-South Coastal Waters of Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 26(5), 531-541.
- [5] Jung, Y.C., 1999, Real-time Oil Spill Dispersion Modelling, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 5(1), 9-18.
- [6] Korea Coast Guard, Marine pollution accident Occurrence Statistics, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1626, 2022 (accessed 2022.08.10.).
- [7] Lee, M.J. and Kang, Y.Q., 2015, Prediction of realtime ocean currents for modeling dispersion of HNS, in *proc. of KOSOMES Fall Conference*, Korea, 367-368.
- [8] 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, *J. Oceanography*, 56, 567-581.
- [9] National Research Foundation of Korea, 2021, Development and expansion of fields of computational science following the development of parallel computing, and changes in research paradigm, *NRF ISSUE REPORT*, 2021(18).
- [10] Pak, S.I. and Oh, T.H., 2010, Correlation and Simple Linear Regression, *J. Vet. Clin.*, 27(4), 427-434.
- [11] Rose, L. and Bhaskaran, P.K., 2015, Tidal Prediction for Complex Waterways in the Bangladesh Region, *Aquatic Procedia*, 4, 532-539.
- [12] Son, S.Y., Lee, C.W., Yoon, H.D. and Jung, T.H., 2017, Development of Highly-Resolved, Coupled Modeling System for Predicting Initial Stage of Oil Spill, *J. Korean Soc. Coast. Ocean. Eng.*, 29(4), 189-197.
- [13] Suh, S.W., 2011, Reproduction of Shallow Tides and Tidal Asymmetry by Using Finely Resolved Grid on the West Coast of Korea, *J. Korean Soc. Coast. Ocean. Eng.*, 23(4), 313-325.

Received 19 September 2022

1st Revised 13 October 2022, 2nd Revised 27 October 2022

Accepted 31 October 2022