

Original Article

해양산업시설 장기영향평가를 위한 해양예측모델 구축 및 배출 HNS의 단기 확산예측 평가

송승헌^{1,†} · 오병철² · 김선호³ · 이문진⁴ · 김태성⁵

¹주해강기술 부설해양방재연구소 선임연구원

²주해강기술 부설해양방재연구소 소장

³주해강기술 부설해양방재연구소 연구원

⁴선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 영년직 책임연구원

⁵선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 선임연구원

Establishment of Ocean Prediction Model for Long-term Impact Assessment in Marine Industrial Facilities and Evaluation of Short-term Spread Prediction of Discharged Hazardous and Noxious Substance (HNS)

Seunghoon Song^{1,†}, Byungcheol Oh², Sunho Kim³, Moonjin Lee⁴, and Tae-Sung Kim⁵

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

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

³Res earcher, 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

우리나라 연안에 위치한 해양 산업시설에서 배출하는 HNS의 영향을 평가하기 위해 수치모델링을 실시하고 데이터베이스를 구축하였다. 데이터베이스를 기반으로 산업시설이 위치한 상세역에 대해 유동장을 구축하였으며, 해역 내에 존재하는 HNS의 실태를 파악하기 위해 채수를 실시하고 2-propanol이 여수 산단으로부터 지속적으로 배출된다는 사실을 확인하였다. 지속적인 해역의 장기영향평가를 진행하기에 앞서 단기 영향평가를 실시하였으며, 방류구에서 발생하는 농도를 추정하였다. 2-propanol의 해역 실태측 최대값은 3.46 mg/L로 반복실험을 통해 St.7에서 모의한 결과의 최대치가 수렴할 수 있도록 방류구의 위치와 제거율을 결정하였다. 관측값에서는 St.8 인근에서의 2-propanol 농도가 급격하게 감소하였으나 모의 결과에서는 지나치게 높게 산출되었다. 방류구에서의 농도가 현 상황에서는 조사가 불가능하여 배출시설에서의 직접적인 모니터링이 현실적으로 불가능한 실정으므로, 추후 배출시설 인근 해역의 공간분포 자료와 방류구의 농도를 조사하여 단기 영향 평가에 대한 모델 검증은 추가적으로 실시해야 할 것으로 판단된다.

Abstract – Numerical modelings were performed and a database was established to evaluate the impact of HNS emitted from marine industrial facilities at the coast in Korea. Based on the database, flow-current field was built for the detailed area where the industrial facilities are located, and water sampling had been implemented to understand the actual condition of HNS in the sea area. It was confirmed that 2-propanol was continuously discharged from the industrial complex in Yeosu. A short-term impact assessment was conducted prior to the continuous long-term impact assessment of the sea area, and the concentration at the discharged point was estimated. The maximum value of 2-propanol actually observed in the sea area was 3.46 mg/L, and through repeated modelings, the location of the outlet and the decay rate were determined so that the maximum value simulated in St.7 could con-

[†]Corresponding author: chobo4616@naver.com

verge. In the observed data, the concentration of 2-propanol in the vicinity of St.8 decreased sharply, but in the simulation result, it was calculated to be too high. The concentration at the discharge port cannot be investigated under the current situation, making direct monitoring at the discharge facility practically impossible. In the future, it is necessary to additionally verify the model for short-term impact assessment by examining the spatial distribution data in the waters near the discharge facility and the concentration of the outlet.

Keywords: Marine industrial facilities(해양산업시설), Hazardous and Noxious Substance(위험유해물질), Estimate of discharge(방류량 추정), Diffusion Numerical Modeling(확산 수치모델링), Short-term impact assessment(단기영향평가)

1. 서 론

우리나라 연안 및 외해의 해양 물리현상을 해석하기 위해 다양한 수치모델을 이용하여 예측 및 예보를 수행해왔다. 체계적으로 일일 예측을 수행하고 자료를 생산하는 대표적인 체계로는 운용해양 시스템(Park *et al.*[2013]; Kwon *et al.*[2020])이 있으며, 현재에 이르러서는 국립해양조사원의 해양예측시스템(Ministry of Ocean and Fisheries[2017])을 이용하여 생산된 자료를 사용할 수 있게 되었다. 하지만 시스템으로 구축된 다양한 수치모델은 연안역의 해석에는 격자해상도가 큰 편으로 해양산업시설이 위치한 연안에 대한 상세한 수치해석에는 적절치 않으며, 다양한 연안역 모델을 사용하여 현업에 반영하고 있다. 기구축된 시스템을 해양산업시설이나 연안역에 바로 적용할 수 없는 현재 상황에서는 자료가 절대적으로 부족하며, 관측 및 모니터링 자료가 미흡하다. 현존하는 해양산업시설에서 해양환경관리법의 적용을 받는 곳은 약 1천여 개로 대부분이 발전시설, LNG 생산시설 등과 같은 규모가 큰 곳에서 위험유해물질(Hazardous and Noxious Substances; HNS) 배출이 이루어지고 있다. HNS는 73/78 MARPOL의 부속서 I, II, 부록 I, II에 등재되고 산적으로 운송하는 기름과 유해액체물질 및 오염등급이 A, B, C, D로 분류된 물질과 혼합물을 말한다. HNS의 환경배출량은 연간 약 4만톤으로 수계 배출량은 연간 약 86톤이 배출되고 있다(Ministry of Environment[2016]). 해양 배출시 HNS는 관례적으로 냉각수나 온배수 등에 혼합하여 배출하고 있으나 배출에 의한 영향을 평가하기 위한 시스템이나 예측모델은 체계적으로 관리되지 못하는 실정이다. 또한, 연간 HNS의 사용량은 점차 증가하면서 해양 및 배출시설 인근 사고, 연안 오염 등의 사례가 함께 증가하게 되었고, 이에 따라 배출규제 및 해양모니터링의 필요성이 제기되었다. 과학적인 자료를 기반으로 한 규제를 위해 필요한 해양모니터링 및 예측모델 등의 자료가 미흡한 해양배출시설의 상황과 달리 하천 인근 산업시설에 대한 폐수, 수질오염물질에 대한 관리는 지속적으로 강화되어 배출허용기준 및 모니터링 대상물질이 2000년 이전 17종에서 2014년 28종, 2018년 29종으로 추가 지정되었으며, 현재 32종(National Institute of Environmental Research[2019])을 관리하고 있다. 32종 중 중금속을 제외한 화학물질은 대부분 HNS에 해당되며, 최종적으로 수계로 배출되어 해양에 유입된다. 이러한 유입과정에서 배출후에 대한 관측정보는 하천수질 측정망을 통해 일부 확인이 가능하나, 내륙에 위치한 산업시설로 한정된다. 해양 환경에서의 배출규제의 경우 선진국에서는 국제협약체계 MARPOL

73/78과 OPRC-HNS 2000 등을 토대로 배출규제를 실시해왔지만 현재 우리나라는 법체계가 미비하고 규제에 따른 산업계 반발 및 경제적 영향으로 이루어지지 못했다(Lee *et al.*[2021]).

본 연구는 해양산업시설에서 직접적으로 수계에 배출되는 물질에 대해서 확산모델에 사용할 수 있도록 해양산업시설 인근의 해양예측모델을 구축하여 검증결과를 제시하였다. 해당 결과를 토대로 장기영향평가를 수행하기 위해 단기 HNS 확산예측을 수행하고 결과를 평가하였다.

2. 예측모델 구축

2.1 조류 예측

동북아 및 우리나라 인근의 조류예측을 위해 전구 조석수치모델을 기반으로 모델링을 실시할 필요가 있다. 조석수치모델은 DTU10 (DTU Global Mean Sea Surface, DTU Space), EOT11a(Empirical Ocean Tide model, PANGAEA)와 같은 FES2004(Finite Element Solution, LEGOS)를 기반으로 한 유럽 최적화 케이스와 HAMTIDE (Hamburg direct data Assimilation Method for TIDES, University Hamburg), FES2014(Aviso+), TPXO9(TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution tidal model, Oregon State University), NAO.99b(Jb) (National Astronomical Observatory of Japan)와 같은 TOPEX/Poseidon(T/P), Jason-1, Jason-2, Jason-3 위성 고도계 데이터를 보간하여 조화상수를 제공하는 모델이 있다. 조화상수 데이터의 해상도는 5분(약 9 km) 이상으로 우리나라 연안을 재현하기에 직접 사용하는 것이 불가능하다.

제공하는 조석수치모델 중 오차가 가장 적은 것은 NAO.99Jb로 인천항을 기준으로 진폭오차가 4.9% 발생하였으며, TPXO9, FES2014는 진폭오차가 10%이상 발생하였다. 따라서, 외측 모델 경계를 NAO.99Jb를 사용하고 내측 격자를 최대 200 m까지 축소하기 위해 Nesting을 진행하여 모델 해상도를 증가시켰다.

광역 동북아 영역에 대해서 3분 간격(약 5.4 km), 중간역 한반도 인근에 대해 1분 간격(약 1.8 km), 배출시설 인근 상세역을 지역별로 분리하여 200 m 간격으로 격자를 구성하였으며, 16개 분조에 대해서 분해하기 위해 약 400일에 대해서 수치모델을 수행하였다. 지역별 상세역 검증 정확도를 조위 기준 오차 5% 이내, 조류의 경우 4대분조 10% 이내, 그 외에는 30% 이내로 보정하였다(Table 1, 2, Fig. 1). 해당 결과를 조화분해하여 조화상수에 의한 신속한 조류예측이 가능하도록 조화상수를 데이터베이스화하였으며, 분조별 u, v

Table 1. Tide Verification Results comparing observed data and model results by harmonic analysis

Sta.	Tidal Constituent	Amplitude (cm)				Phase (°, g)		Error		Sta.	Tidal Constituent	Amplitude (cm)				Phase (°, g)		Error	
		Obs.		Mod.		Obs.	Mod.	Amp. (%)	Pha. (°)			Obs.		Mod.		Obs.	Mod.	Amp. (%)	Pha. (°)
		Obs.	Mod.	Obs.	Mod.							Obs.	Mod.	Obs.	Mod.				
T1	M2	286.2	288.6	137.2	162.1	0.8	24.9	T6	M2	6.1	4.7	88.8	72.2	23.0	-16.6				
	S2	112.7	101.9	195.9	217.7	9.6	21.8		S2	2.0	1.4	116.4	121.2	30.0	4.8				
	K1	39.4	35.2	304.1	314.1	10.7	10.0		K1	4.6	4.9	1.4	346.0	6.5	-15.4				
	O1	25.2	26.1	265.3	280.3	3.6	15.0		O1	4.4	5.0	319.5	314.6	13.6	-4.9				
T2	M2	220.1	227.4	89.8	91.6	3.3	1.8	T7	M2	69.7	76.6	311.3	310.6	9.9	-0.7				
	S2	81.6	82.4	143.1	139.0	1.0	-4.1		S2	29.5	29.8	341.0	337.3	1.0	-3.7				
	K1	34.4	31.7	280.7	278.4	7.8	-2.3		K1	23	22.7	219.0	216.5	1.3	-2.5				
	O1	26.2	23.7	246.8	246.8	9.5	0.0		O1	16.8	16.9	188.1	190.1	0.6	2.0				
T3	M2	101.2	108.5	259.2	261.5	7.2	2.3	T8	M2	75.7	83.3	281.8	278.9	10.0	-2.9				
	S2	47.4	48.2	297.2	292.7	1.7	-4.5		S2	33.7	34.9	310.8	308.4	3.6	-2.4				
	K1	20.2	18.5	198.3	182.0	8.4	-16.3		K1	24.5	24.4	209.6	205.3	0.4	-4.3				
	O1	12.2	13.0	150.3	153.6	6.6	3.3		O1	17.7	18.5	176.0	178.6	4.5	2.6				
T4	M2	54.4	60.7	243.8	244.9	11.6	1.1	T9	M2	79.9	80.8	8.7	357.0	1.1	-11.7				
	S2	25.7	27.9	280.2	276.1	8.6	-4.1		S2	27.3	28.3	45.5	29.1	3.7	-16.4				
	K1	7.8	7.4	162.5	160.3	5.1	-2.2		K1	19.7	20.4	238.8	231.5	3.6	-7.3				
	O1	4.3	4.2	129.8	127.7	2.3	-2.1		O1	15.6	15.2	207.5	205.4	2.6	-2.1				
T5	M2	3.1	1.7	122.7	108.9	45.2	-13.8	T10	M2	4.5	4.7	57.8	53.1	4.4	-4.7				
	S2	0.7	0.9	178.5	208.9	28.6	30.4		S2	1.5	1.2	78.6	89.4	20.0	10.8				
	K1	4.2	4.3	9.2	349.7	2.4	-19.5		K1	4.8	5.1	349.4	339.5	6.3	-9.9				
	O1	4.3	4.6	321.8	317.8	7.0	-4.0		O1	4.7	5.2	310.9	309.3	10.6	-1.6				

Table 2. Tidal Current Verification Results comparing observed data and model results by harmonic analysis

Sta.	Tidal Constituent	Amplitude (cm/s)				Phase (°, g)		Error		Sta.	Tidal Constituent	Amplitude (cm/s)				Phase (°, g)		Error	
		Obs.		Mod.		Obs.	Mod.	Amp. (%)	Pha. (°)			Obs.		Mod.		Obs.	Mod.	Amp. (%)	Pha. (°)
		Obs.	Mod.	Obs.	Mod.							Obs.	Mod.	Obs.	Mod.				
C1 (East)	M2	27.5	26.9	352.6	4.3	2.2	11.7	C1 (North)	M2	76.2	57.4	155.9	159.6	24.7	3.7				
	S2	7.5	9.5	43.0	55.4	26.7	12.4		S2	23.2	19.1	210.0	206.5	17.7	-3.5				
	K1	3.0	1.5	152.2	123.5	50.0	-28.7		K1	5.7	7.6	290.0	264.2	33.3	-25.8				
	O1	2.1	1.2	106.1	100.9	42.9	-5.2		O1	5.7	5.3	240.7	236.2	7.0	-4.5				
C2 (East)	M2	82.4	74.0	43.7	47.6	10.2	3.9	C2 (North)	M2	56.0	63.0	77.1	75.4	12.5	-1.7				
	S2	26.4	27.9	98.9	102.3	5.7	3.4		S2	21.8	24.1	132.0	124.7	10.6	-7.3				
	K1	5.7	4.6	205.0	215.9	19.3	10.9		K1	5.2	6.6	241.3	230.0	26.9	-11.3				
	O1	2.7	3.3	165.6	178.6	22.2	13.0		O1	4.4	4.6	192.8	197.3	4.5	4.5				
C3 (East)	M2	30.3	32.8	40.2	24.9	8.3	-15.3	C3 (North)	M2	46.1	44.5	55.1	55.4	3.5	0.3				
	S2	13.9	12.3	66.0	74.6	11.5	8.6		S2	23.3	17.0	76.2	98.0	27.0	21.8				
	K1	5.9	4.2	240.0	227.7	28.8	-12.3		K1	10.1	9.4	233.1	236.2	6.9	3.1				
	O1	2.0	3.2	196.3	194.4	60.0	-1.9		O1	5.2	6.5	189.4	201.7	25.0	12.3				
C4 (East)	M2	39.1	45.7	146.3	142.6	16.9	-3.7	C4 (North)	M2	63.5	68.0	354.6	350.7	7.1	-3.9				
	S2	21.3	18.6	193.1	181.4	12.7	-11.7		S2	29.0	26.2	54.2	31.4	9.7	-22.8				
	K1	13.6	10.5	341.8	8.1	22.8	26.3		K1	29.4	18.3	234.8	225.8	37.8	-9.0				
	O1	7.9	8.3	308.8	334.8	5.1	26.0		O1	19.4	14.6	189.9	193.3	24.7	3.4				
C5 (East)	M2	36.7	42.3	69.6	42.9	15.3	-26.7	C5 (North)	M2	9.3	19.7	185.8	200.5	111.8	14.7				
	S2	14.6	16.2	123.7	77.1	11.0	-46.6		S2	4.9	8.8	222.3	228.6	79.6	6.3				
	K1	13.7	13.1	314.7	284.3	4.4	-30.4		K1	2.5	1.8	257.9	162.2	28.0	-95.7				
	O1	12.3	10.6	278.8	254.2	13.8	-24.6		O1	1.2	1.3	218.3	148.2	8.3	-70.1				

백터에 대한 값을 시간에 따라 예측하도록 하여 해류 성분과 합성을 할 수 있도록 분리하였다.

2.2 해류 예측

조류 예측방법과 동일한 영역과 해상도를 설정하여 해류 예측을 실시하였다. 해류 예측을 위해 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean

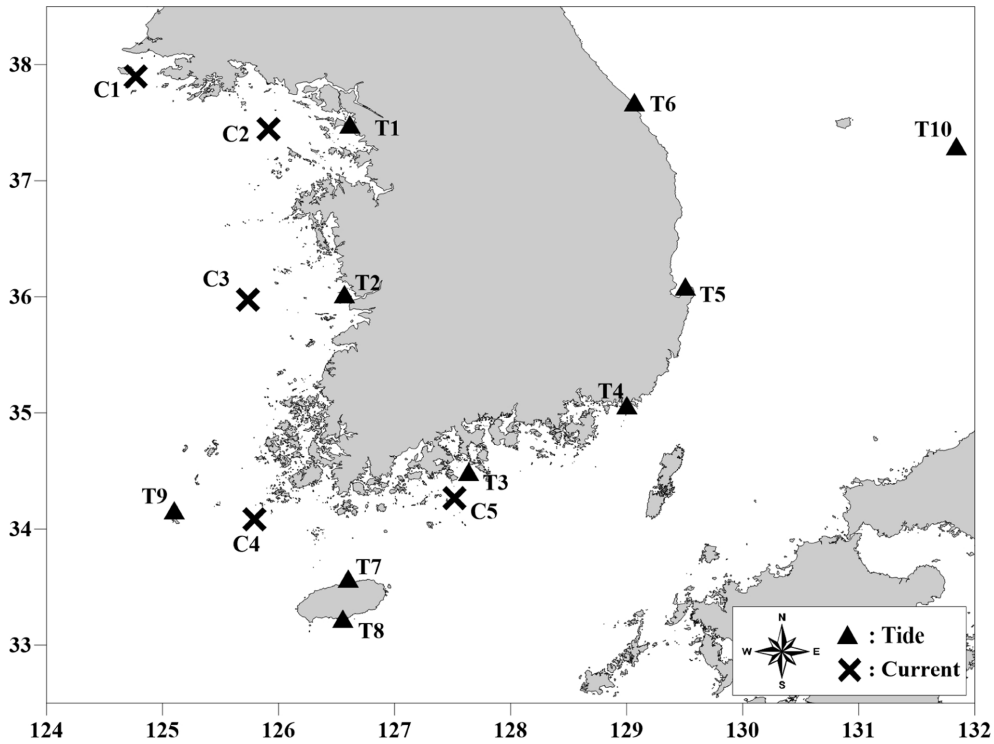


Fig. 1. Observed Tide and Tidal Current Stations by KHOA(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency) used to validate the Numerical model.

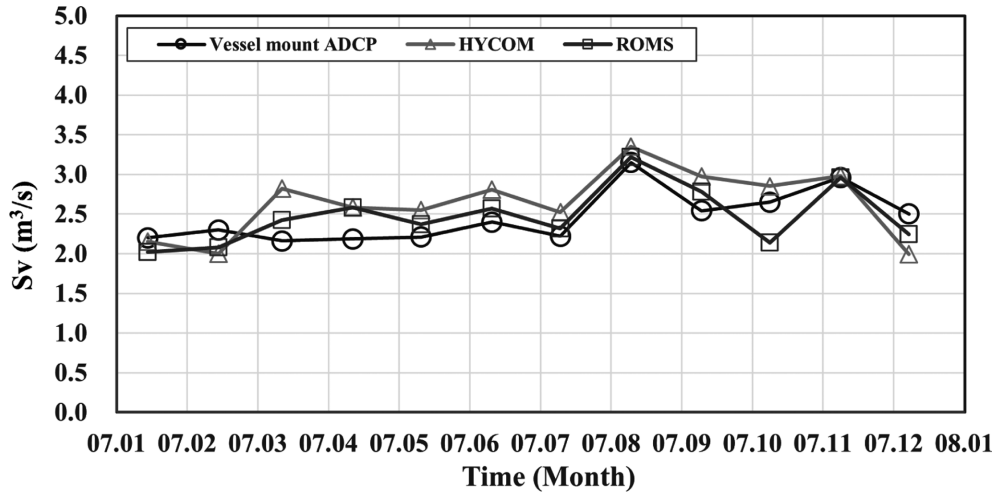


Fig. 2. Verification of ocean current transport volume (Observed value of the Korea Strait, Seo *et al.*[2013]).

Model, COAPS) 전구 해류 예측 모형의 자료를 경계조건으로 사용하였으며 기상자료는 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 재분석 자료를 사용하였다.

표층 해류를 검증하기 위해 2018년 KHOA 계절 평균 자료와 OSCAR 표층 수온 자료를 비교하였으며, 2007년 대한해협 수송량 관측자료와 ROMS 결과를 비교하였다. 표층 수온의 경우 정선관측결과와 위성자료를 비교하였을 때 대산항 인근에서 2018년 4월, 5월 자료에서 저온이 관측되었으나 ROMS 모형에서는 재현이 불

가능하였다. 표층 수온 분포를 위성자료와 비교하였을 때 오차가 2°C 이내로 나타났다. 표층 염분의 경우 제주 인근에서 모델 결과가 0.5 psu 낮게 나타났으며, 인천 경기만 내부의 연안 인근에서 모델 결과가 인천 0.5 psu, 평택 1.0 psu 만큼 높게 예측되었다.

해류의 수송량을 검증하기 위해서 2005년부터 2010년까지 부산-하카타 운항 중에 ADCP 관측을 통해 얻은 유속자료를 사용하였다. 수송량을 비교하기 위해 Seo *et al.*[2013]에서 계산한 결과를 인용하였다(Fig. 2). 모델 결과는 해당 논문에서 사용한 방법을 유

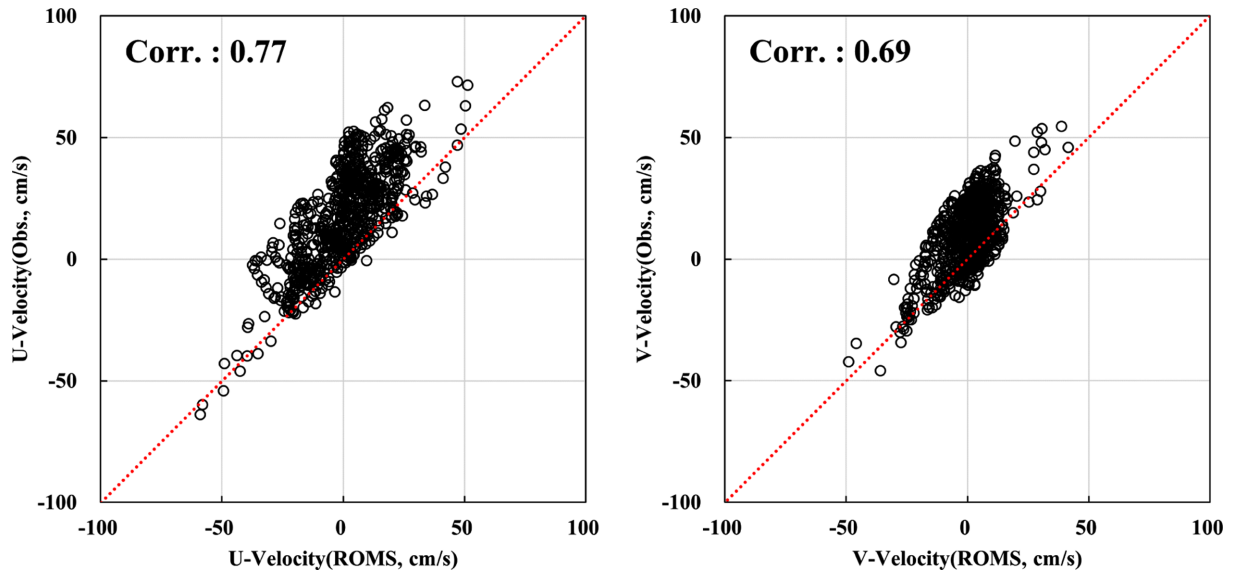


Fig. 3. Correlation comparison analysis result of u, v current vectors between observed values and model results(2018, ROMS result-Observed Buoy Data in Korea strait).

사하게 활용하였으며, 서수도-동수도의 계산한 위치를 모델결과에서 추출하였다. 2007년 관측결과를 모델결과와 비교한 결과, 관측

값이 2.456Sv이었으며, 모델 결과는 2.475Sv으로 나타나 오차가 1% 이내로 모델 결과가 매우 유사하였다. 해류 모델링은 2007년

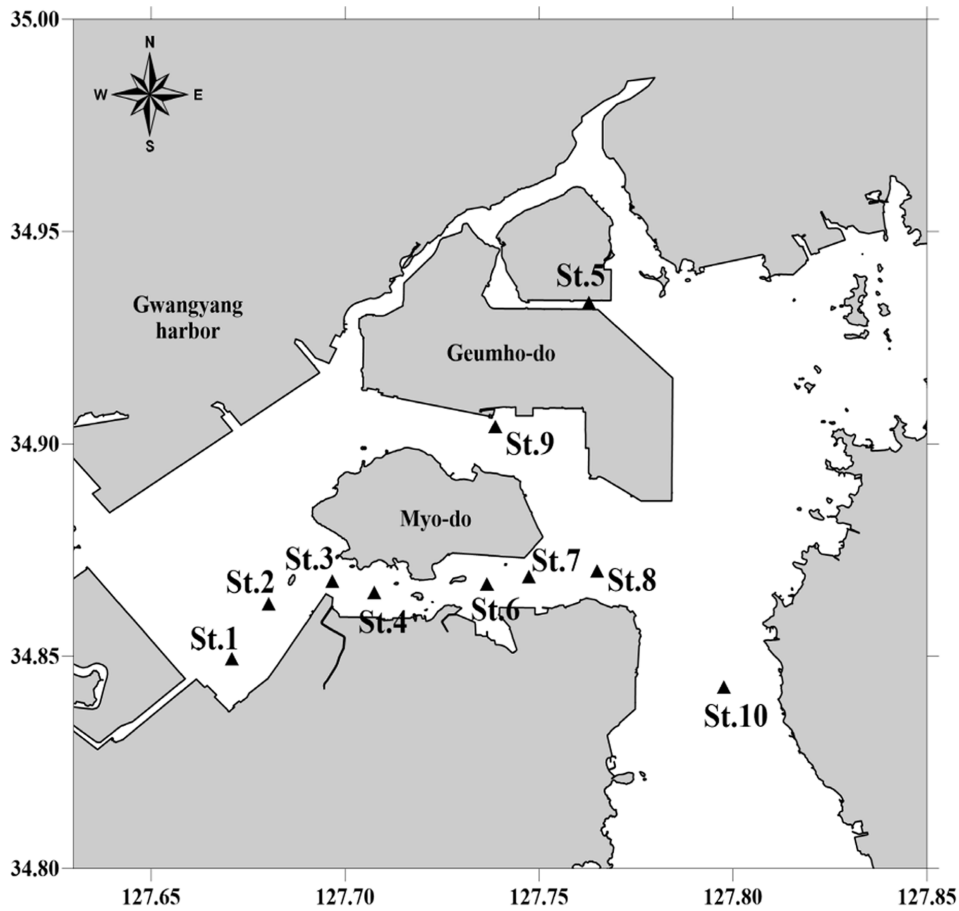


Fig. 4. Location map of the sampling points in Yeosu.

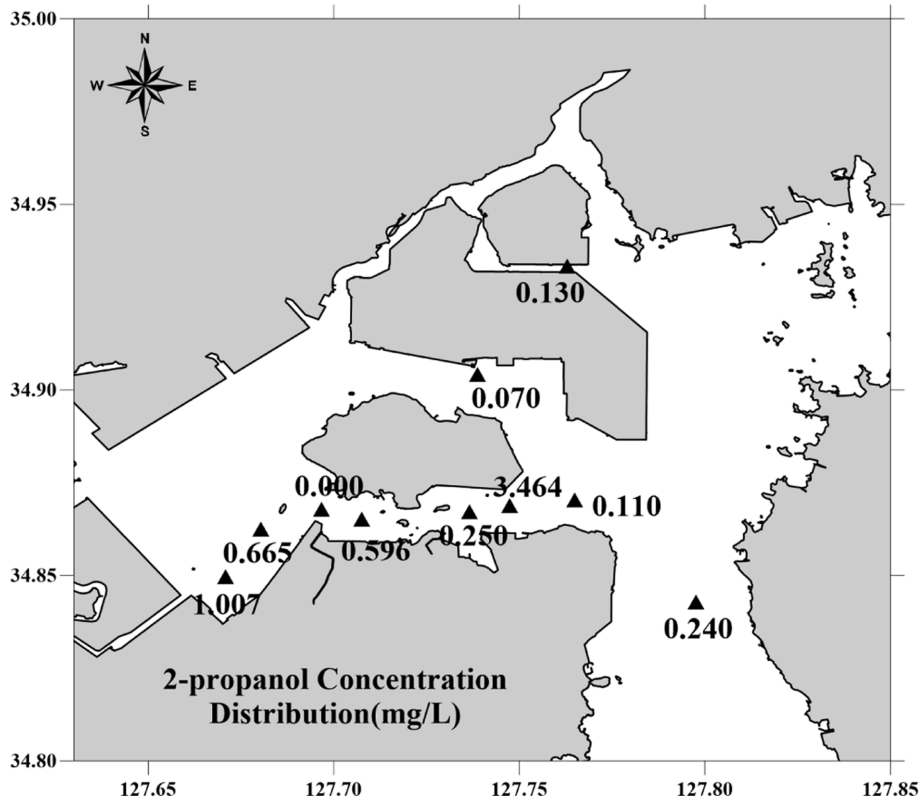


Fig. 5. Concentration distribution of 2-propanol in Yeosu.

수송량 검증 시점을 기점으로 장기수행을 진행하였다. 해류는 관측 결과와 모델결과를 비교하기 위해 2018년 대한해협 관측자료와 2018년 모델 결과를 동방성분과 북방성분을 분해하여 동일시간에 같은 성분을 비교하였다. 같은 성분끼리의 상관계수와 기울기를 기준으로 두 수치가 1에 가까울수록 모델이 관측결과를 잘 재현한 것으로 판단하였다. 표층 유속을 기준으로 비교한 결과, 동방성분의 상관계수가 0.77, 북방성분이 0.69, 두 성분의 기울기는 1.00으로 관측값과 유사하게 재현하였음을 알 수 있었다(Fig. 3).

2.3 배출시설 배출 HNS 대상 선정

위험유해 후보물질을 대상으로 해양산업시설의 최종 방류구에서

배출되는 위험유해물질의 배출실태를 2020년에 조사하였다. 최종 방류구 주변 해역의 수질에서 위험유해물질의 분포특성 및 오염도를 확인하는 데 목적이 있으며, 위험유해물질의 농도 및 유입량을 확인하여 이를 기반으로 해양산업시설에서 해역으로 유입되는 위험유해물질의 배출실태를 모델링하였다. 조사해역인 여수·광양 산단은 울촌산단과 여수산단, 철강 관련 공장, 석유화학 및 발전소가 있으며, 해역적 특성으로는 남해 중앙부의 반-폐쇄성 내만 해역으로 유속이 비교적 약하고 남북방향의 유속 분포를 보인다. 1960년대부터 산업단지 및 발전소에서의 수계 배출이 진행되었으며 현재 까지도 수계에 의한 상시 배출이 진행되는 것으로 파악되었다. 표층 10개 정점(Fig. 4)에서 수계로 배출되는 물질을 대상으로 분석

Table 3. Tide Verification Results (Yeosu, 200 m)

Sta.	Tidal Constituent	Amplitude (cm)		Phase (°, g)		Error	
		Obs.	Mod.	Obs.	Mod.	Amp.	Pha.
Galsari	M2	95.2	97.1	264.5	261.4	1.9	-3.1
	S2	44.6	45.7	301.8	297.2	1.1	-4.6
	K1	18.3	19.2	185.5	184.9	0.9	-0.6
	O1	12.6	13.1	151.0	150.1	0.5	-0.9
Walne-dong	M2	97.1	96.6	261.3	261.3	-0.5	0.0
	S2	45.5	45.5	297.3	296.9	0.0	-0.4
	K1	18.8	19.1	184.3	185.0	0.3	0.7
	O1	12.8	13.1	149.4	150.2	0.3	0.8

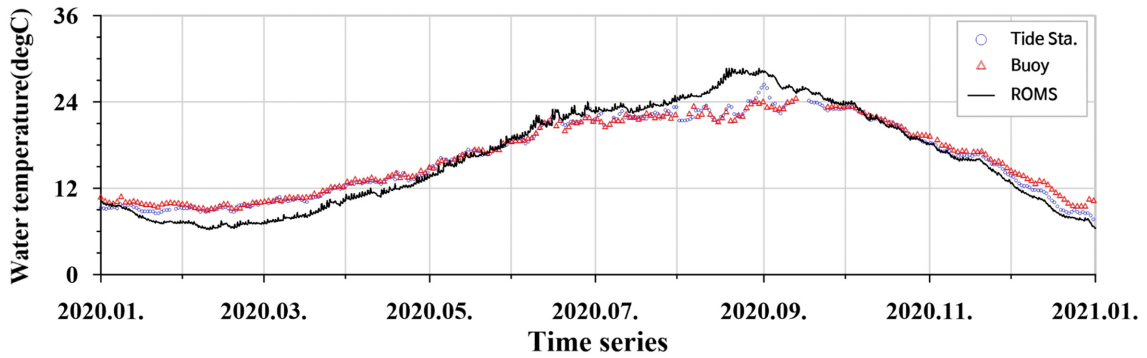


Fig. 6. Comparison of Water Temperature (ROMS Model) at Yeosu Port, Buoy of Observed Data in 2020.

하였다. 채취한 시료는 열탈착식 입력부 튜브에 흡착된 휘발성 유기 화합물을 기체상태로 탈착시켜 비활성 기체인 헬륨가스로 극성에 의한 끌림 현상을 유발시켜 순차 분리하는 방식을 사용하여 분석하였다(TD-GCMS, Song *et al.*[2021]).

분석결과 2-propanol이 9개 정점에서 검출되었으며(Fig. 5), Ethanol이 4개 정점에서 발견되었다. Ethanol의 경우 4개 정점이 규칙성 없이 산발적으로 농도가 나타나 기존 방류구로 유추되는 St.1, St.6 지점에서의 방류 농도를 추정할 수 없었다.

이에 따라 2-propanol을 대상 물질로 선정하고 방류구에서 농도를 역추정하였다.

2.4 해양배출시설 인근 상세역 구축

배출시설에서의 예측정확도 확보를 위해 추가적으로 상세역의 격자를 작성하였다. 기존 광역, 중간역을 기반으로 한 Nesting을 실

시하였으며, 상세역의 격자는 200 m로 구성하였다. 조류 예측 및 HNS 확산 평가는 Delft3D 모델을 사용하였으며, 해류는 기존 ROMS 모델을 활용하였다. 상세역은 2020년 관측자료를 확보한 여수 산단 인근을 구성하였으며, 예측정확도 확보를 위해 기본수준 점 및 TPXO9-atlas-v5(Egbert *et al.*[2002]; [2021]) 조석 데이터베이스를 기존 구성한 내용과 비교하여 모델을 검증하였다. 초기 경계 및 내부 검증을 위해 여수항, 선구리, 봉우항, 술상항 관측자료를 사용하였다. 광양항(금호도) 자료는 1982~1983년 관측된 자료로 제외하였다. 기상자료는 기존과 동일하게 ECMWF 재분석 자료를 사용하였다. 수온의 경우 여수항 조위관측소 및 해양관측부이 자료를 활용하였다. 갈사리와 월내동 4대 분조를 확인한 결과 관측값과 진폭은 2 cm 이내, 지각은 5° 이내로 매우 유사하게 나타났다(Table 3). 수온은 2020년 연중 변화를 비교하였을 때 계절 변화 및 지역적 특성을 Fig. 6과 같이 잘 반영한 것으로 나타났다.

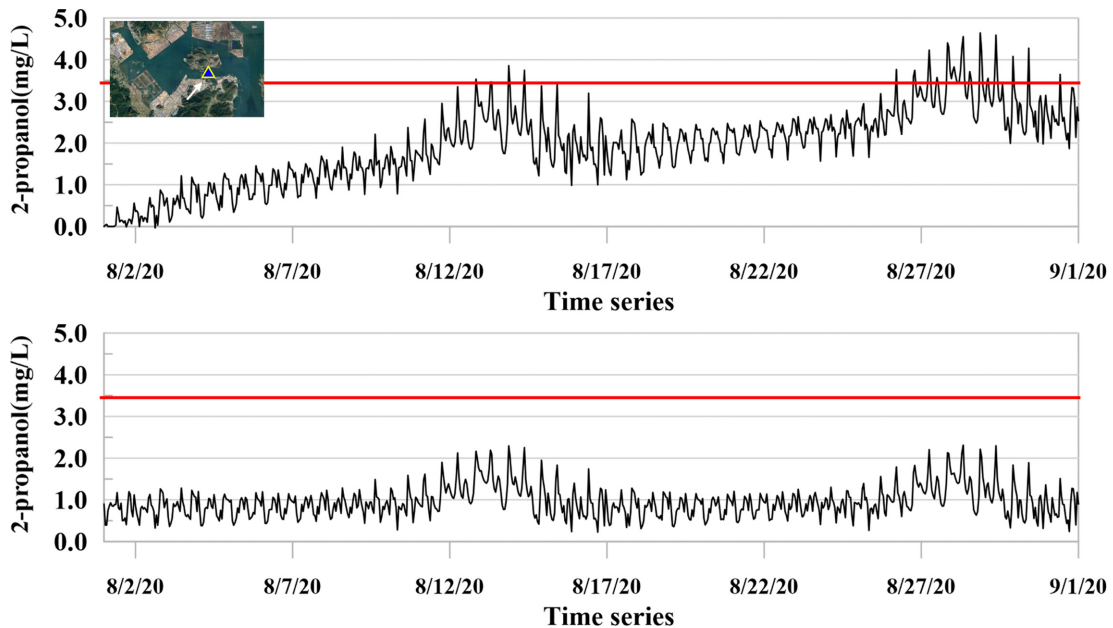


Fig. 7. Primary Modeling result in 2-propanol concentration (1st figure, Fig. 7-a) and 2nd Modeling result of set decay daily rate (2nd figure, Fig. 7-b). Red line was observed maximum concentration (3.46 mg/L).

3. 배출 HNS 단기 예측 평가 결과

3.1 해역 평가

모델 내 물질 농도를 산정하기 위해서는 기본적으로 시간 경과에 따른 해역내 물질 농도가 수렴하는지 확인할 필요가 있다. 2-propanol의 정확한 방류 농도 및 방류구의 위치, 수량 등을 파악하기 이전에 가장 많은 양이 배출되는 St.6에서의 배출농도가 가장 높을 것으로 가정하고 해당 지점만 배출하였을 때 모델 내부에서의 시간에 따른 농도변화를 검토하였다. 초기 실험 결과 Fig. 7-a과 같이 여수 산단 해역의 전체 농도가 지속적으로 상승하였다. 기본적으로 해역이 폐쇄된 만 형태에 가깝고(Choi *et al.*[2017]) 내측에서의 하천 유량이 외부로 밀고 나갈 만큼 크지 않아(Chung and Ceon[2009]) 내-외측 혼합효과를 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

3.2 일 제거율 산정

해역 관측 최대 농도는 3.46 mg/L로 관측 최대 농도를 정확히 평가하기 위해서는 초기 실험 결과에서 배경농도를 수렴시킬 필요가 있다. 실제 해역에서는 배출된 HNS가 확산되고 소모되어 해역에서의 농도가 크게 변동되지 않으며, 지속적으로 동일한 농도가 배출된다고 가정했을 때 일정 수준으로 유지되어야 한다. 이를 위해 초기 실험 조건에서 수렴되는 제거율을 산정하기 위해 반복 실험을 수행하였다. 수행 결과 0.102 mg/L에서 수렴하였으며 결과는 Fig.

7-b와 같았다. 단일 지점에서는 2-propanol의 농도가 관측 최대치보다 0.96 mg/L만큼 작게 나타났으나 전체 분포에서는 일정치 않았으며, 해당 수치만큼 방류구에 농도를 증가시켜 추가 실험하였으나 다른 조사점에서의 농도가 과도하게 높거나 낮게 산정되었다. 이를 해결하기 위해 추가적인 방류구를 설정하여 해역 농도를 평가해야 할 것으로 추정하였다.

3.3 방류구 추가 설정 및 해역 농도 평가

방류구 추가 설정을 위해 전국 공공폐수처리시설 운영현황(Ministry of Environment[2020])을 참고하였다. 읍촌천과 수어천에 산단에서 배출된 폐수가 처리되어 방류되는 것으로 확인되었으며, 기존 방류구로 설정하였던 여수월내 처리시설은 70,000 m³/day, 여수중흥 처리시설은 65,000 m³/day를 처리할 수 있으므로, 두 곳의 방류가 지속적으로 이루어진다고 가정할 수 있다. 해당 지점은 운영 통계자료 주 소지를 근거로 결정하였으며, 상세역 격자내 해당 위치에서 방류하도록 구현하였다.

지점별 2-propanol의 농도를 모델 한 달 평균 및 관측 최대치와 비교한 결과 기존 한 개소 방류구 실험 결과에 비해 공간분포가 유사하게 재현되었다. 대조기에 방류된 2-propanol의 농도가 빠르게 확산되어 Fig. 8과 같이 창/낙조류에 의해 여수 산단 내에 농도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 대조기를 제외한 일반적인 상황에서는 해역 내에 확산이 느리게 나타났으며, St.2 인근에서의 유

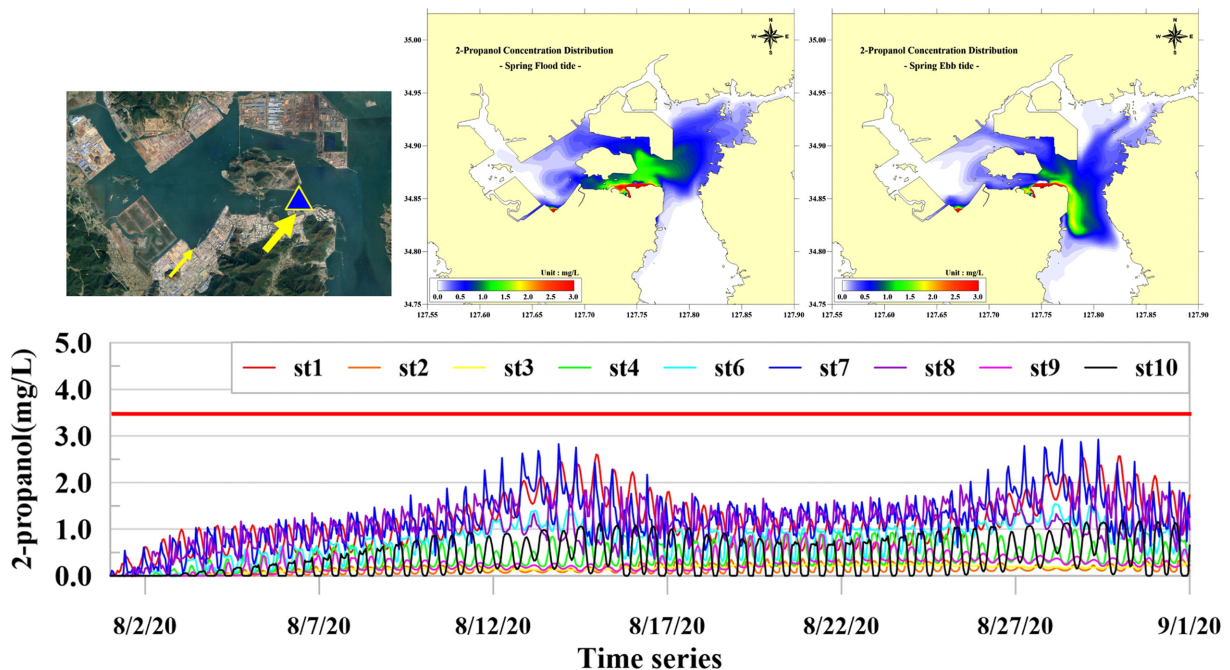


Fig. 8. Concentration distribution of 2-propanol at spring flood/ebb tide and comparison of monthly time series concentration change by observed station.

Table 4. Comparison of the observed data of 2-propanol and the modeling monthly mean data

mg/L	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10
obs	1.00	0.66	-	0.59	0.13	0.25	3.46	0.11	0.07	0.24
mod	1.15	0.14	0.15	0.40	-	0.74	1.19	1.09	0.27	0.42

비해 모델값은 0.14 mg/L로 낮게 분포하였다(Table 4). St.8에서는 모의된 값이 실제 관측값보다 크게 나타났으며 St.7의 농도와 유사하게 모의되었다. St.5에서는 관측치에서는 2-propanol이 해역 내 존재하는 것으로 나타났지만, 모의 결과에서는 나타나지 않았다. 실제 여수 산단 내측에 존재하는 강이나 하천의 방류량 및 산단 내측 처리시설의 합류지점이 두 곳 이외에도 분포하여 추가적인 HNS의 유입 및 유속분포를 산단 내 서측에서 유발시키는 것으로 판단된다.

4. 결 론

해양 산업시설에서의 HNS 배출의 관리주체가 명확하지 않고, 시설별 배출농도가 명확하지 않아 그동안의 관리가 명확하게 이루어지지 않았다. 해역 내 HNS의 농도 및 인과관계에 대한 조사가 진행되지 않아 검증에 위한 자료가 부족하고 수치모델을 이용한 평가가 실시되지 않았다. 이번 평가체계를 시작으로 산단 인근 해역에 대한 평가 기반을 구축하고, 해경 및 관계 부처의 협력을 통해 방류구 HNS 배출농도에 대한 조사가 이루어져 정확한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 취득한 시료의 HNS 분석이 간단하지 않아 다수의 시계열 데이터를 취득하지 못하는 것도 평가모델 구축에 제한점으로 작용하였다. 해수에서 HNS의 풍화 및 생물 분해 요인에 대한 명확한 인과관계를 모델 예측 시 제거율로 적용하는 것에 대한 과학적인 근거가 부족한 것도 평가체계 구축을 위해서는 해결해야 하는 요인 중 하나였다.

이번 단기 확산예측을 통해 방류구에 대한 위치를 추정하고, 해당 위치에서의 농도분포를 추정하였다. 이를 통해 추가적인 연구에서는 방류구에서의 배출 HNS를 현재 수준보다 명확히 분석하고, 해당 농도에 따른 공간분포를 예측하여 장기 확산예측 및 해역영향 평가를 실시해야 한다. 해역의 해양물리 데이터는 지속적인 모의를 통해 데이터베이스로 축적하여 배출 HNS 데이터가 모니터링되었을 때 연동할 수 있도록 연계 방안을 제공하고, 평가 시스템으로 구축하는 노력을 지속해야 할 것이며, 타 산단 지역의 관측데이터를 기반으로 한 단기 평가 결과를 비교하여, 더 합리적인 HNS 거동에 대한 평가가 이루어질 수 있도록 체계를 구축해야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20210660, 해양산업시설 배출 위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발).

References

- [1] Choi, M.H., Seo, H.S. and Kim, D.S. 2017, A Study on the Distribution of Summer Water Temperatures of the Central Coast of the Southern Sea of Korea Using Numerical Experimentation, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 23(1), 83-90.
- [2] Chung, M. and Ceon, I. K. 2009, Characteristics of Salinity Variation at Downstream Reach of the Seomjin River, *The Soc. for Environ. Technology*, 10(4), 254-260.
- [3] Egbert Gary, D. and Svetlana Y. Erofeeva, 2002, Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmospheric and Ocean. Technology*, 19(2), 183-204.
- [4] Egbert Gary D. and Svetlana Y. Erofeeva, 2021, OSU TPXO Tide Models – TPXO9-atlas v5(<https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas>), CEOAS (College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences), Oregon State University.
- [5] Kwon, J.I., Heo, K.Y., Choi, J.Y., Choi, J.W., Jeong, S.H., Kwon, Y.Y., Kim, H.J., Park, G.S., Jeong, J.Y., Park, Y.G., Jin, H.K., Song, K.M., Choi, B.J., Kim, Y.H., Woo, S.B., Kim, D.H., Hyun, S.K., Choi, Y.J., Heo, C.W. and Lee, S.H., 2020, Operational Ocean Forecasting System (KOOS) R&D Status and Utilization of Current Issues, *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies Joint Conference*.
- [6] Lee, M.J., Kim, K.W. and Kang, W.S., 2021, A Study on the Necessity and Direction of Regulations on the Emission of Hazardous and Noxious Substances from Marine Industrial Facilities, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 27(6), 737-743.
- [7] Ministry of Environment, 2016, Pollutant release and transfer register (2001-2016).
- [8] Ministry of Oceans and Fisheries, 2017, Ocean prediction system maintenance for stable production of ocean prediction data – Result Report, National Oceanic Research Institute, 11-1192136-000344-01.
- [9] Ministry of Environment, 2020, State of operation of public wastewater treatment facilities nationwide, *Water Quality Management Division*.
- [10] National Institute of Environmental Research, 2019, Application standards for wastewater discharge facilities, *Specific Water Hazardous Substance Emission Investigation System*.
- [11] Park, G.S., Kim, K.C., Lee, J.C., Kwon, J.I., Jo, K.H., Choi, J.W., Kim, S.D., Kim, S.I., Kim, Y.H. and Choi, J.Y., 2013, Introduce Study of Korea Operational Oceanographic System, *The Spring International Conference of the Hydrographic Soc. KOREA*, 69-71.
- [12] Seo, S.B., Park, Y.G., Park, J.H., Lee, H.J. and Kirose, N., 2013, The Tsushima Warm Current from a High Resolution Ocean Prediction Model, *HYCOM, Ocean and Polar Res.*, 35(2), 135-146.
- [13] Song, M.K., Lee, H.J., Oh, S.H., Park, C.H., Jeon, Y.H. and Bae, M.S., 2021, Prospects of Standard Analysis for Ambient VOCs using TD-GCMS-Comparison of External and Internal Calibration Methods, *J. Korean Soc. for Atmospheric Environ.*, 37(2), 355-366.

Received 19 September 2022

Revised 13 October 2022

Accepted 19 October 2022