

한국 연안의 장주기 조석성분이 총 수위 예측에 미치는 영향에 관한 연구 A Study on The Effects of Long-Term Tidal Constituents on Surge Forecasting Along The Coasts of Korean Peninsula

김지하* · 장필훈** · 강현석***
Jiha Kim*, Pil-Hun Chang** and Hyun-Suk Kang***

요지 : 우리나라 연안의 30개 조위관측소에서 관측된 조위자료를 조화분해하여 2021년에 대한 해역별 장주기 조석성분의 특성 및 장주기 조석성분이 총 수위 예측에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 먼저 관측조위의 조화분해 결과, 우리나라 연안에서 장주기 조석성분은 연주조(S_a)와 반년주조(S_{sa})가 우세하였으며, 해역별로는 서해안에서 약 17.8 cm의 상대적으로 큰 진폭을 보였다. 계속해서 총 수위 예측에 대한 영향을 살펴보고자, 2021년을 연구 기간으로 장주기 조석성분이 포함된 예측조위와 포함되지 않은 예측조위를 생산하였고, 각각의 예측조위를 폭풍해일 모델의 해일고 예측결과에 더하여 총 수위를 생산하였다. 장주기 조석성분을 고려하지 않은 총 수위와 고려한 총 수위의 오차를 비교한 결과, 전반적으로 뚜렷한 계절적 차이가 나타났다. 장주기 조석성분을 고려하지 않은 총 수위에 비해, 장주기 성분이 고려된 총 수위는 여름철에는 오차가 큰 폭으로 감소하였고, 겨울철에는 강한 음의 편차를 보이며 오차가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 우리나라 겨울철의 강한 고기압과 같은 기상현상에 의한 영향이 예측조위와 해일고 예측결과에 이중으로 반영되어 나타난 결과로 해석되었다. 해일고 예측결과를 조화분해하였을 때, 연주기 성분이 우세하였고 이를 장주기 조석성분이 고려된 총 수위에서 제거하였을 때, 특히 겨울철에 나타난 강한 음의 편차가 사라지고 연평균 RMSE도 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 장주기 조석성분, 예측조위, 해일고, 총 수위

Abstract : In this study we investigated the characteristics of long-term tidal constituents based on 30 tidal gauge data along the coasts of Korea and its the effects on total water level (TWL) forecasts. The results show that the solar annual (S_a) and semiannual (S_{sa}) tides were dominant among long-term tidal constituents, and they are relatively large in western coast of Korea peninsula. To investigate the effect of long-term tidal constituents on TWL forecasts, we produced predicted tides in 2021 with and without long-term tidal constituents. The TWL forecasts with and without long-term tidal constituents are then calculated by adding surge forecasts into predicted tides. Comparing with the TWL without long-term tidal constituents, the results with long-term tidal constituents reveals small bias in summer and relatively large negative bias in winter. It is concluded that the large error found in winter generally caused by double-counting of meteorological factors in predicted tides and surge forecasts. The predicted surge for 2021 based on the harmonic analysis shows seasonality, and it reduces the large negative bias shown in winter when it subtracted from the TWL forecasts with long-term tidal constituents.

Keywords : double-counting, long-term tidal constituents, predicted tide, surge height, total water level forecasts

1. 서 론

폭풍해일은 태풍이나 강한 저기압의 영향으로 해수면이 이상적으로 상승하는 것을 의미하며, 그 특성은 태풍의 최대풍속이나 중심 저기압, 이동 속도, 상륙 각도, 해안 경사, 수심, 지형 등 다양한 요소에 의해 결정된다(Park and Park, 2021).

특히, 우리나라 서해안과 남해안은 섬이 많은 복잡한 지형이며 조석 간만의 차가 커서 태풍 내습 시기와 만조 시기가 겹칠 경우, 연안 지역에서는 침수·범람으로 인한 인명과 재산피해가 발생할 수 있다. 이러한 피해를 사전에 대비하기 위해서는 높은 정확도의 총 수위(Total Water Level; TWL) 예측정보가 요구된다. 이를 위해 여러 현업기관에서는 조석·폭풍해

*국립기상과학원 예보연구부 연구원(Corresponding author: Jiha Kim, Researcher, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea, Tel: +82-64-780-6573, Fax: +82-64-738-6514, udk1117@korea.kr)

**국립기상과학원 예보연구부 연구관(Senior Research Scientist, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences)

***국립기상과학원 예보연구부 연구관(Senior Research Scientist, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences)

일 모델(Tide-Storm surge model)과 조석 모델(Tide model)의 차이로 해일고(surge height)를 계산하고, 이를 연안 조위 관측소의 조위자료를 조화분해하여 구한 예측조위(predicted tide)와 더해 총 수위 예측정보를 생산한다. 이때 예측조위는 조석 모델의 예측결과보다 정확도가 높다고 가정한다. 따라서, 특정 해역의 총 수위 예측 정확성을 높이는 데 있어 예측조위를 이해하는 것은 중요한 요소라 할 수 있다.

해수면은 천문조에 의한 변동뿐만 아니라 대기압, 바람, 비부피 효과(steric effect) 등 기상현상의 직간접적인 영향에 의해서도 변동이 나타난다(Pugh, 1987). 장주기 조석성분(S_a , S_{sa} , M_m , M_{sf} , M_f 등)은 천문조와 같이 달과 태양의 인력에 의해 생성된 분조이나 그 주기가 수일에서 1년 이상을 나타내기 때문에 인력의 영향은 실제로 매우 적고, 기상현상에 의해 해수면이 계절적으로 변동하는 에너지를 포함하고 있다. 이러한 장주기 조석성분을 이해하는 것은 폭풍해일에 의한 연안 피해 저감에 중요한데, 이와 관련하여 Jeong et al.(2005)은 항만 설계에서 중요한 인자인 조위 발생 확률분포의 재현성을 향상시키기 위해서는 동해안의 경우 연주조(S_a)와 반년주조(S_{sa})를 추가해야 함을 주장하였다. 또한 설계조위를 산정할 때 해역별로 조위의 특성 차이가 있으므로 남해안과 동해안은 S_a 분조를 포함한 설계조위를 반영해야 한다는 대안이 제시되었다(Kang et al., 2014; Ko et al., 2016). 한편 Kang et al.(2008)은 한반도 주변의 S_a 분조의 조화상수(진폭, 지각) 변동성은 대기압과 비부피 효과에 의한 영향이 크고, 바람과 담수 유출에 의한 영향은 미미하다고 주장하였다.

S_a 와 S_{sa} 분조는 주요 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)에 비해 해수면 변동에 미치는 영향력은 적으나, 1년 이상의 자료를 조화분해할 시에 그 영향력은 상대적으로 크게 나타날 수 있다(NOAA, 2007). 그러나 해마다 조화상수 값이 다르게 나타나기 때문에 특정 연도의 조위자료로 예측조위를 생성할 경우, 예측성이 떨어질 수 있다. 이에 관해 Byun et al.(2021)은 인천 조위관측소의 20년(1999~2018년) 조위자료 분석을 통해 안정적인 S_a 조화상수 값을 계산해내기 위해서는 5년 이상의 관측자료를 사용하여야 하고, 최대 19년 자료를 사용하는 것이 바람직하다고 주장하였다.

본 연구에서는 우리나라 연안의 30개 조위관측소에서 관측된 조위자료를 조화분해하여 해역별 장주기 조석성분의 특성을 살펴보고, 장주기 조석성분이 총 수위 예측에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 아울러, 조위 관측자료 기간에 따른 장주기 조석성분의 차이도 해역별로 살펴보았다. 2장에서는 조위 관측자료와 조화분해 방법에 관해서 설명하고, 해일고 예측결과를 생산하기 위한 수치모델에 대해서 언급한다. 3장에서는 우리나라 해역별 장주기 조석성분과 예측조위 특성을 살펴보고, 장주기 조석성분에 따른 총 수위 예측 특성을 분석하였다. 그리고 4장에서는 장주기 조석성분이 고려된 총 수위에 이중으로 반영된 기상현상의 영향에 대해 토의하였다. 마지막으로 5장에서 연구 결과를 요약하였다.

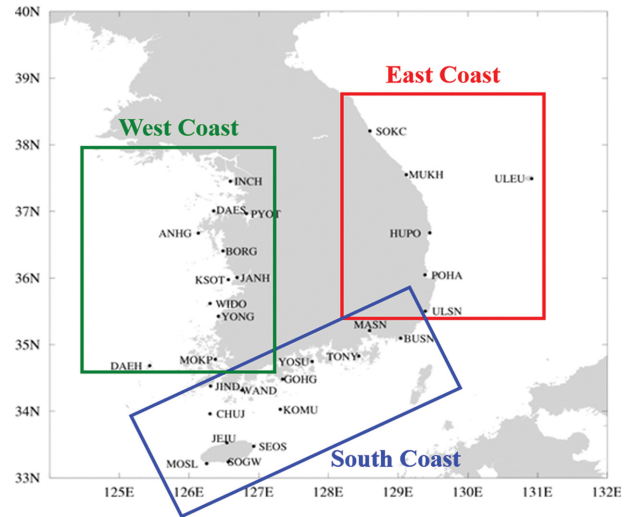


Fig. 1. Location map of 30 tidal observation stations in this study, along the coasts of Korea.

2. 자료 및 방법

2.1 예측조위 생성

우리나라 연안에서의 해역별 장주기 조석성분의 특성을 살펴보고자 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency; KHOA)의 주요 30개 조위관측소에서 관측된 1시간 간격 조위자료를 이용하였다. Fig. 1은 해당 조위관측소 지점을 표시하고 각 지점을 해역별로 구분한 것이다. 참고로 속초~울산(SOKC~ULSN) 조위관측소는 동해안으로, 부산~진도(BUSN~JIND) 조위관측소는 남해안, 그리고 대흑산도~인천(DAEH~INCH) 조위관측소를 서해안으로 구분하였다.

본 연구에서는 관측자료의 기간에 따른 민감도도 살펴보고자, 1년(2020년)과 5년(2016~2020년) 기간의 조위 관측자료를 조화분해하여 장주기 조석성분(S_a , S_{sa} , M_m , M_{sf} , M_f)이 포함된 조화상수를 생산하였다. 계속해서, 각각의 조화상수를 이용해 30개 조위관측소에서의 2021년도 예측조위를 생성하였고, 추가로 장주기 조석성분을 포함하지 않는 57개의 조화상수를 바탕으로 한 예측조위도 생성하여 총 수위 예측에 대한 장주기 조석성분의 효과를 알아보려고 하였다.

조화분해 및 예측조위를 생성하기 위해서 포트란 기반 프로그램인 Task2K(Tidal Analysis Software Kit; Bell et al., 1999)와 MATLAB 기반의 UTide (Codiga, 2011) 프로그램을 이용하였다. Byun et al.(2019)은 Task2K 프로그램의 조석 조화분해 과정에서 18.61년 주기로 변하는 분조의 평균 진폭을 보정하기 위한 교점 인자와 교점 각을 관측자료의 길이와 상관없이 자료 중간 해당 시각에 대하여 분조별로 구하고, 이를 분석 자료의 전 기간에 걸쳐 동일한 값을 적용하기 때문에 3년 이상의 장기자료 분석에는 적합하지 않다고 제시한 바 있다. 이에 반해 UTide 프로그램은 관측된 시각마다 분조별로 교점 인자와 교점 각을 계산하여 사용하며 최대 18.61년까지의 관측자료 분석이 가능하다. 본 연구에서는 Byun et

al.(2019)의 결과를 참조하여, 1년간의 조위자료를 조화분해할 때 Task2K 프로그램을, 5년간의 조위자료에는 UTide를 각각 이용하였다.

2.2 총 수위 예측정보

2.1절에서 구한 각각의 예측조위에 수치모델을 통해 계산한 해일고 예측결과를 더해 장주기 조석성분 반영 여부에 따른 총 수위 예측 특성을 분석하였다. 해일고 예측결과는 NEMO(Nucleus for European Modelling of the Ocean; Madec, 2016) 모형 기반의 지역 규모 폭풍해일 예측모델(Regional Tide-Storm surge Model; RTSM)을 이용하여 생성하였다(La et al., 2020). RTSM은 2차원 순압모델로 한반도 주변 해역인 황해, 남해, 동해 및 동중국해와 서태평양 일부를 포함한 영역(115°E~150°E, 20°N~52°N)으로 구성되며, 약 8 km의 수평해상도를 갖는다. 수심 자료는 National Aeronautics and Space Administration(NASA)의 30분 간격 고해상도 자료인 Shuttle Radar Topography Mission(SRTM; Becker et al., 2006)을 이용하였다(Fig. 2). 수치모델의 개방경계 조건은 오리건주립대학교(Oregon State University)에서 제공하고 있는 global tide model인 TPXO 7.2의 14개 분조(M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_f , M_m , M_4 , MS_4 , MN_4)를 사용하였고, 대기 입력 자료는 기상청 전지구 수치예보시스템(Global Data Assimilation Prediction System; GDAPS)의 1시간 간격 10 m 바람장과 평균 해면기압 자료를 활용하였다(Table 1).

RTSM은 조석·폭풍해일 모델(Tide-Storm surge model)과 조석 모델(Tide model)로 구성되는데, 각각의 예측모델로 2021년 기간에 대해 12시간 간격으로 일 2회 120시간 예측을 수행하였다. 해일고 예측결과는 조석·폭풍해일 모델과 조석 모델의 차이로 계산하고, 예측 초기의 12시간 예측자료를 추출하여 분석에 사용하였다. 이렇게 생산된 해일고 예측결

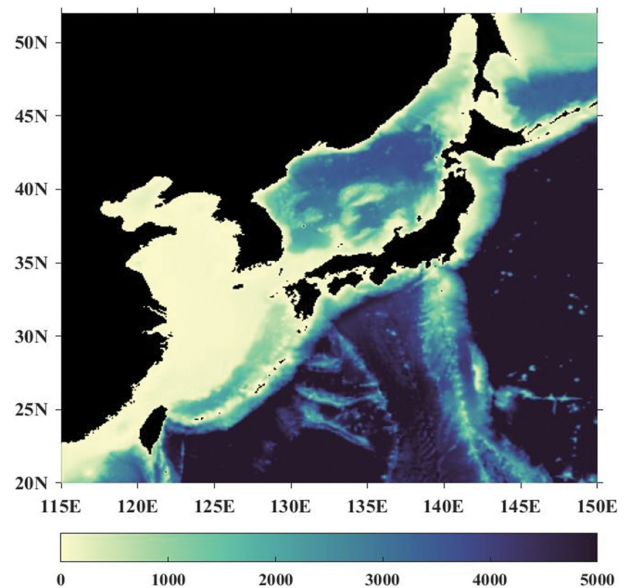


Fig. 2. Model domain and topography (m).

과를 2.1절에서 설명한 각각의 예측조위와 더해 총 수위를 계산하였다(Table 2). 본 연구에서는 편의상 1년간의 조위자료를 바탕으로 장주기 조석성분을 포함하지 않은 결과(조화상수, 예측조위, 총 수위)를 모두 NLT 실험으로 정의하고, 마찬가지로 1년간의 조위자료를 바탕으로 장주기 조석성분을 포함한 결과는 LT01 실험으로 정의하고, 5년간의 조위자료를 바탕으로 장주기 조석성분을 포함한 결과는 LT02 실험으로 정의하고자 한다.

3. 결 과

3.1 해역별 장주기 조석성분의 특성

연안 30개 조위관측소 지점에서 관측한 1년(2020년)과 5년(2016~2020년) 기간의 조위자료를 조화분해하여 우리나라

Table 1. Specifications of Regional Tide-Storm surge Model (RTSM)

Name	RTSM
Model	NEMO v3.6
Domain	115°E~150°E, 20°N~52°N
Horizontal Resolution	1/12° (421 × 385)
Bathymetry	SRTM
Initial data	-12 hr forecast
Boundary data	TPXO 7.2 (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4 , M_f , M_m , MN_4 , MS_4)
Input data	GDAPS (10 m wind, MSLP)
Prediction and Start time	120 hr (00, 12 UTC)

Table 2. Experiments and their conditions

Experiments	Harmonic analysis	Data period	Tidal constituents
NLT	Task2K	2020	57 (without S_a , S_{sa} , M_m , M_{sf} , M_f)
LT01	Task2K	2020	62 (with S_a , S_{sa} , M_m , M_{sf} , M_f)
LT02	UTide	2016~2020	68 (with S_a , S_{sa} , M_m , M_{sf} , M_f)

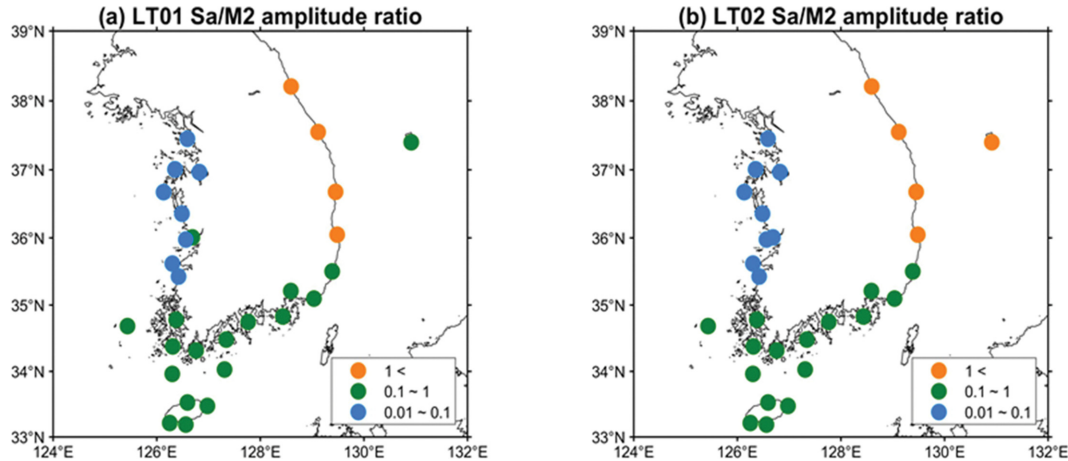


Fig. 3. Amplitude ratio of M_2 and S_a at 30 tidal stations. Left panel shows result calculated from LT01, and right panel is from LT02. Here, orange circles indicate amplitude ratio greater than 1, green circles indicate values between 0.1 and 1, and blue circles indicate values between 0.01 and 0.1.

연안에서의 장주기 조석성분(S_a , S_{sa} , M_m , M_{sf} , M_t)의 특성을 살펴보았다. 5개 장주기 분조의 조화상수 결과를 비교하였을 때, 모든 조위관측소에서 연주조(S_a)와 반년주조(S_{sa})의 진폭이 우세한 것으로 나타났다. 이에 본 절에서는 장주기 조석성분이 포함된 LT01과 LT02에 대해 자료 기간에 따른 S_a 와 S_{sa} 분조의 특징을 해역별로 살펴보고, 이들 장주기 분조만으로 2021년 예측조위를 계산하여 계절별 특성을 파악하였다.

먼저 S_a 와 S_{sa} 분조의 진폭과 지각을 살펴보았을 때, 두 실험의 평균 진폭은 S_a 분조가 15.2 cm로 S_{sa} 분조(2.5 cm)에 비해 약 6배 정도 큰 값을 보였고, 모든 조위관측소에서 연주기 성분이 우세한 것으로 나타났다(Table 3). 해역별 비교에서 S_a 분조의 경우, 서해안(DAEH-INCH)이 동해안(SOKC~ULSN)과 남해안(BUSN~JIND)에 비해 약 3.5~7 cm 높은 진폭을 보였으며, S_{sa} 분조는 해역별로 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

두 실험 간의 진폭을 비교한 결과, 전반적으로 두 분조 모두 큰 차이를 보이지 않았다. S_a 분조는 평균 1 cm 이내의 차이를 보였는데, 동해안과 서해안에서는 LT01이, 남해안에서는 LT02가 다소 큰 진폭을 보였다. S_{sa} 분조의 진폭은 서해안에서 1.5 cm의 차이를 보였으나 대체로 비슷한 크기를 보이는 것으로 나타났다. 하지만 울릉(ULEU) 조위관측소에서 두 실험 간의 S_a 진폭 차이는 8.7 cm로 모든 조위관측소 중 가장 큰 차이를 보였고, 장항(JANH) 조위관측소에서도 S_a 와 S_{sa} 진폭 차이가 각각 3.7 cm와 4.9 cm로 나타나 상대적으로 큰 차이를 보였다. 해당 지점은 연별로 조화상수 값이 다소 큰 차이가 있는 것으로 보이며, 장주기 조석성분을 포함하는 예측조위를 생성할 경우, 다년간의 조위자료를 조화분해하여 얻은 조화상수 값을 고려하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 아울러, S_a 분조의 평균 지각은 LT02가 296.8°로 LT01의 평균 지각인 143.8°보다 약 75° 큰 값을 보였다. 이는 Byun et al.(2021)과 유사한 결과(78°)로, 해당 연구에서는 이러한 지

각 차이가 조화분해 기법의 차이로 인해 나타날 수 있음을 언급한 바 있다.

LT01과 LT02의 S_a 진폭에 대하여 천문조 중 진폭이 가장 큰 M_2 분조와 진폭비를 구해 장주기 조석성분의 상대적인 크기를 조위관측소별로 살펴보았다(Fig. 3). 그 결과, 해역별로 진폭비가 뚜렷하게 구분되었는데, M_2 분조의 진폭이 상대적으로 작은 동해안의 속초(SOKC), 묵호(MUKH), 후포(HUPO), 그리고 포항(POHA) 조위관측소에서 1 이상의 진폭비를 보여 동해안은 연주기 성분이 상대적으로 중요한 해역임을 확인할 수 있었다. 진폭비는 남해안과 서해안으로 갈수록 점차 감소하는 결과를 보였다. 한편 Table 3에서 예상되듯이, LT01과 LT02의 S_a 진폭 차이가 상대적으로 큰 울릉(ULEU)과 장항(JANH) 조위관측소에서 실험 간 진폭비 차이가 크게 나타났다.

계속해서 LT01과 LT02의 5개 장주기 분조만을 사용하여 각 조위관측소의 2021년 예측조위를 계산하고, 평균값을 제거한 편차를 Fig. 4에 나타내었다. 예측조위 편차는 두 실험 모두 1월부터 4월까지 -10 cm 이하의 값이 나타났으며, 6월부터 10월경까지 양의 값으로 증가하였고, 이후 다시 감소하는 계절 변동성을 보였다. 또한, 동해안에 비해 남해안과 서해안이 겨울철에는 더 낮고 여름철에는 더 높은 결과를 보였다. LT01과 LT02의 결과를 비교하면, 묵포(MOKP)와 거문도(KOMU) 조위관측소 등 일부 지점을 제외하고 전반적으로 LT02의 계절성이 더 뚜렷하게 나타났는데, 대체로 서해안과 남해안에서 겨울철에 상대적으로 강한 음의 경향을 보였다.

다른 조위관측소와 달리 울릉(ULEU) 조위관측소의 예측조위는 계절성이 약하게 나타났다. 특히 LT01에서 울릉 조위관측소의 S_a 진폭이 1.8 cm로 작고, 약 14.77일의 주기를 갖는 M_{sf} 분조의 진폭이 1.2 cm로 S_{sa} 진폭보다 크게 나타나 예측조위 편차가 0에 가깝게 나타났다. 아울러, LT02에서는 묵포(MOKP) 조위관측소의 장주기 분조 중 S_{sa} , M_m , M_{sf}

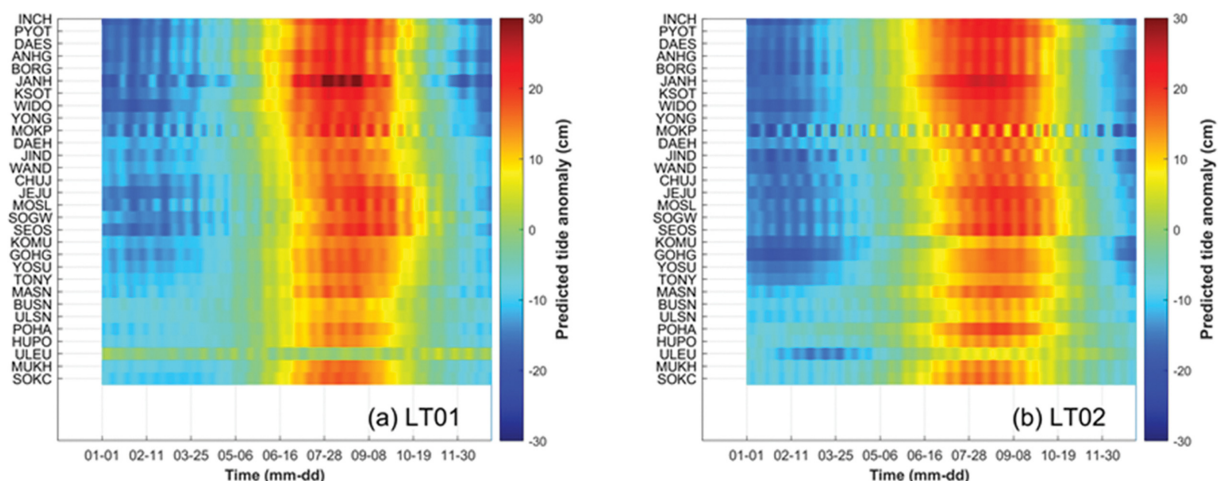


Fig. 4. Time series of predicted tide anomaly in 2021, based on the long-term tidal constituents at 30 tidal stations. Left panel shows result from LT01, and right panel does LT02.

Table 3. Tidal harmonic constants of S_a and S_{sa} derived from LT01 and LT02 predicted tide, at 30 tidal stations along the coasts of Korea. H indicates an amplitude, and G indicates a phase lag. Note that stations are denoted in Fig. 1

St.	LT01				LT02			
	S_a		S_{sa}		S_a		S_{sa}	
	H (cm)	G (°)	H (cm)	G (°)	H (cm)	G (°)	H (cm)	G (°)
SOKC	13.6	143.5	3.6	276.5	11.9	215.3	2.4	276.0
MUKH	12.4	143.7	3.9	281.8	11.0	218.6	2.4	278.5
ULEU	1.8	190.1	0.8	119.6	10.5	240.6	1.7	176.0
HUPO	11.3	140.7	3.1	288.0	10.4	219.9	2.2	288.8
POHA	12.2	141.2	3.6	301.4	11.9	218.0	3.4	308.9
ULSN	10.3	140.6	2.5	288.8	10.8	223.0	2.3	316.0
BUSN	9.9	141.8	2.3	281.4	10.6	221.2	1.7	320.7
MASN	13.4	138.9	3.6	295.4	13.4	219.2	2.0	332.2
TONY	13.1	145.7	2.4	308.1	13.5	222.9	1.5	341.6
YOSU	14.9	145.6	2.9	303.7	15.4	222.2	1.8	355.1
GOHG	15.4	145.9	1.9	310.1	17.7	221.9	2.1	2.7
KOMU	14.0	149.5	1.8	315.2	14.6	225.4	2.2	347.9
SEOS	17.7	151.9	2.9	340.4	16.6	224.4	2.1	345.3
SOGW	16.3	157.6	2.1	334.5	16.2	227.8	2.2	345.3
MOSL	16.3	150.4	3.6	341.0	16.2	225.5	2.4	345.5
JEJU	17.7	150.4	2.7	336.5	17.5	223.2	2.1	345.3
CHUJ	15.6	148.4	2.0	302.2	15.6	222.8	1.8	327.3
WAND	14.1	142.5	2.2	302.4	15.7	220.2	2.4	355.2
JIND	15.1	142.5	2.0	297.0	16.1	219.5	1.8	351.5
DAEH	13.9	138.4	1.9	279.7	14.6	216.3	1.6	324.9
MOKP	17.6	139.5	3.6	297.0	16.7	212.7	2.6	331.9
YONG	17.2	137.8	3.1	293.1	16.7	215.3	1.8	315.2
WIDO	18.8	135.9	1.4	324.9	17.8	213.1	1.5	345.1
KSOT	18.6	135.9	3.9	295.3	18.0	213.3	2.3	302.2
JANH	22.7	135.1	7.5	285.8	19.0	211.3	2.6	309.8
BORG	17.9	136.1	3.0	287.4	17.8	212.0	1.6	325.0
ANHG	18.5	129.3	3.2	287.5	17.7	210.8	1.8	315.4
DAES	17.5	136.8	2.4	304.5	16.6	211.0	1.2	331.6
PYOT	18.2	141.5	2.5	314.5	17.5	214.0	1.7	336.1
INCH	19.5	135.5	3.4	311.2	18.7	210.4	2.1	331.3

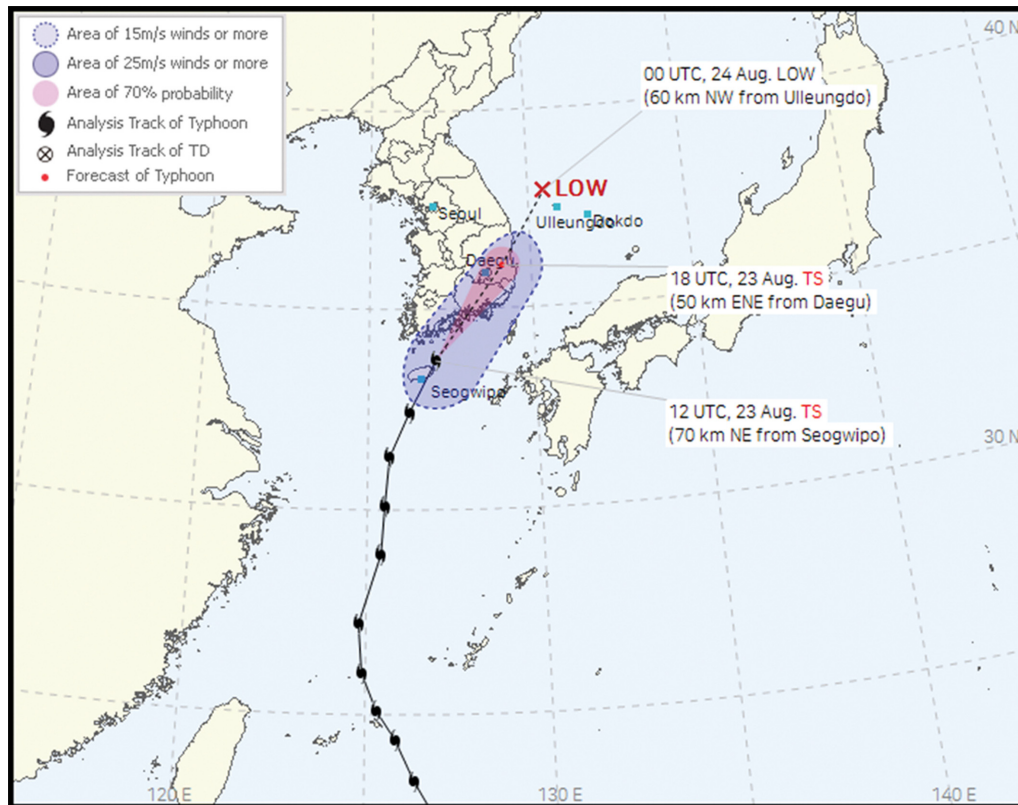
M_f 분조의 진폭이 1.5~6.0 cm로 다른 조위관측소들에 비해 약 3배 더 큰 값을 보여 예측조위 편차가 짧은 주기로 강하게 진동하는 경향이 나타났다.

3.2 장주기 조석성분이 반영된 총 수위 예측 특성

장주기 조석성분의 반영 여부에 따른 총 수위의 특성을 분석하기 위해 각 실험별 조화상수로부터 생성한 2021년 예측

Table 4. Bias and Root Mean Square Error (RMSE) of total water level (TWL) from experiments of NLT, LT01 and LT02. Errors are in winter and summer for 2021. Unit is cm

		NLT		LT01		LT02	
		bias	RMSE	bias	RMSE	bias	RMSE
Winter	East Coast	-2.6	4.3	-7.7	8.4	-10.3	10.8
	South Coast	-0.2	6.2	-10.8	12.1	-13.8	14.9
	West Coast	-2.0	11.1	-13.9	17.4	-15.7	18.7
	Total	-1.6	7.2	-10.8	12.6	-13.3	14.8
Summer	East Coast	-11.9	12.8	1.0	8.8	-0.5	6.6
	South Coast	-14.1	15.5	1.3	6.7	-0.8	6.5
	West Coast	-15.3	18.8	5.7	12.2	2.3	10.8
	Total	-13.8	15.7	2.7	9.2	0.3	8.0

**Fig. 5.** Track of Typhoon OMAIS in August 2021.

조위를 폭풍해일 모델(RTSM)의 해일고 예측결과와 더하여 총 수위 예측자료(TWL)를 생산하였다. 우선 계절적인 특성을 알아보기 위해 겨울철(1, 2, 12월)과 여름철(7, 8, 9월)에 대하여 관측조위에 대한 실험별 총 수위의 평균 편향(bias) 및 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE)를 해역별로 구하여 살펴보았다(Table 4).

전체적으로 장주기 조석성분의 반영 여부에 따라 총 수위 예측오차는 계절별로 뚜렷한 차이를 보였다. 겨울철에 장주기 조석성분이 고려되지 않은 NLT 실험의 총 수위 bias는 -1.6 cm로 나타났고, LT01과 LT02의 bias는 평균 -12.1 cm 정도를 보이며 상대적으로 음의 경향이 강하게 나타났다. 반면에 여름철은 NLT 총 수위에서 -13.8 cm로 강한 음의 bias를 나타냈고, LT02의 bias가 0.3 cm를 보이는 등 장주기 조

석성분이 고려된 총 수위에서는 작은 오차를 보였다. RMSE 또한 겨울철에는 NLT의 오차가 평균 7.2 cm로 가장 작았던 반면, 여름철에는 LT01과 LT02의 RMSE가 상대적으로 작은 값을 보였다. 해역별로는 장주기 조석성분 반영 여부와 관계없이 모든 계절에서 서해안의 bias와 RMSE가 크게 나타났는데, 이는 조석의 크기에 비례한 결과로 판단된다. 장주기 조석성분의 반영 여부에 따른 총 수위의 계절별 오차 특성에 관해서는 4장에서 토의하고자 한다.

태풍과 같은 위험기상 시기에 총 수위 예측결과가 어떻게 나타나는지 알아보려고 2021년 우리나라에 상륙했던 태풍 ‘오마이스(OMAIS)’의 사례를 선정하여 각각의 총 수위 시계열을 관측조위와 함께 비교하였다. 태풍 오마이스는 8월 20일 일본 오키나와 남남동쪽 약 850 km 부근 해상에서 발생

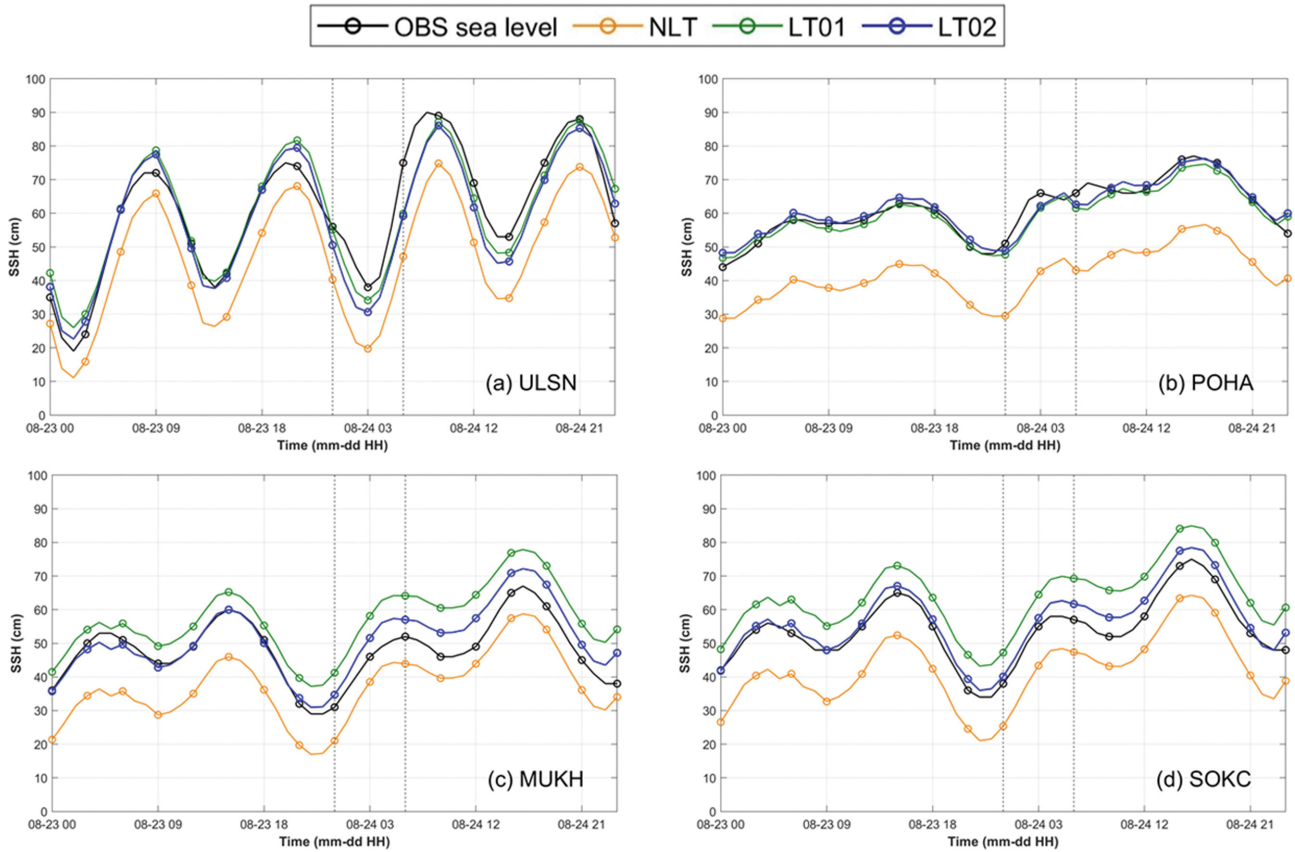


Fig. 6. Time series of the observations and total water levels from three experiments (NLT, LT01, LT02) at (a) ULSN, (b) POHA, (c) MUKH, and (d) SOKC tidal stations during Typhoon OMAIS. Black dotted lines indicate the period of typhoon.

하여 8월 24일 00시에 중심기압 996 hPa, 최대풍속 18 m/s로 경남 고성군에 상륙해 포항을 거쳐 8월 24일 06시에 울릉도 부근에서 온대저기압으로 변질되어 소멸하였다(Fig. 5). 여기에서는 태풍 영향과 수위상승 시기가 겹치는 동해안의 울산(ULSN), 포항(POHA), 묵호(MUKH)와 속초(SOKC) 조위관측소에 대해 8월 23일부터 24일까지의 관측조위와 총 수위를 비교하였다(Fig. 6). 그 결과, 네 조위관측소 모두 장주기 조석성분이 고려된 LT01과 LT02의 총 수위가 태풍 영향 전부터 이후까지 관측조위와 비슷한 값을 보였고, NLT는 상대적으로 예측성이 낮은 결과를 보였다. 포항 조위관측소에서 관측조위와의 RMSE가 NLT에서는 18.7 cm인 것에 반해 LT01과 LT02의 RMSE는 평균 2.7 cm로 네 조위관측소 중 가장 큰 차이를 보였다. 태풍의 강도가 비교적 약해서 기상현상에 따른 뚜렷한 수위상승은 볼 수 없으나, 속초(SOCK) 조위관측소를 볼 때, 태풍의 영향이 있기 전 기상현상이 약한 시기에 관측과 유사한 값을 보이는 LT02가 결과적으로 위험기상 시의 재현성도 높은 것으로 판단된다.

4. 토 의

서론에서 언급한 바와 같이 조위 관측자료는 대기압, 바람, 비부피 효과 등과 같은 기상현상의 영향을 받기 때문에 예측

조위에도 이러한 기상 관련 조석 성분(radiational tides)이 포함된다. 해일고 또한 입력장인 대기압과 바람에 의해 수위가 변동하기 때문에 총 수위에는 기상현상의 효과가 이중으로 반영(double-counting)될 수 있다(Williams et al., 2018a, 2018b). 3.2절에서, 겨울철 LT01과 LT02 총 수위의 RMSE가 NLT에 비해 약 2배 큰 값을 보였는데, 이는 특히 겨울철 강한 고기압에 의한 영향이 예측조위와 해일고 예측결과에 이중으로 반영되어 나타난 결과로 판단된다. 본 장에서는 총 수위의 계절변동에 중점을 두고 총 수위에 이중으로 반영된 기상현상의 영향에 대해 살펴보고자 하였다. 이를 위해, 먼저 해일고 예측결과를 조화분해하여 해일고에 포함된 기상현상(대기압, 바람)의 영향을 검토하고, 계속해서 이를 총 수위에서 제거하여 겨울철에 보인 총 수위의 강한 오차의 변화를 살펴 보았다.

2.2절에서 언급한 폭풍해일 모델을 이용하여 과거 2년간(2020.05.~2022.04.)의 수치실험을 수행하였고, 실험 결과를 이용하여 30개 연안 조위관측소에서의 해일고 예측결과를 조화분해하였다. Table 5는 해일고의 분조별 진폭으로, 진폭이 큰 순서대로 8개 분조를 나타낸 것이다. 진폭을 살펴보았을 때, 모든 조위관측소에서 S_4 분조가 우세하였으며, 평균 11 cm의 진폭을 나타내었다. 동해안(SOKC~ULSN)에서 서해안(DAEH~INCH)으로 갈수록 점차 진폭이 증가하는 결과를 보

Table 5. Amplitude of surge height harmonics at 30 tidal stations along the coasts of Korea in 2021. Unit is cm

St.	Tidal harmonic constants (Amplitude)							
SOKC	$S_a(10.0)$	$S_{sa}(1.7)$	$M_m(0.9)$	$M_{sm}(0.8)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.2)$	$M_2(0.2)$	$S_1(0.1)$
MUKH	$S_a(9.9)$	$S_{sa}(1.7)$	$M_m(0.9)$	$M_{sm}(0.7)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.2)$	$M_2(0.2)$	$S_1(0.1)$
ULEU	$S_a(9.5)$	$S_{sa}(1.6)$	$M_m(1.0)$	$M_{sm}(0.7)$	$M_f(0.5)$	$M_{sf}(0.3)$	$S_1(0.2)$	$M_2(0.2)$
HUPO	$S_a(9.9)$	$S_{sa}(1.7)$	$M_m(0.8)$	$M_{sm}(0.7)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.3)$	$M_2(0.2)$	$S_1(0.2)$
POHA	$S_a(9.9)$	$S_{sa}(1.8)$	$M_m(0.7)$	$M_{sm}(0.7)$	$S_1(0.4)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.3)$	$K_1(0.3)$
ULSN	$S_a(9.9)$	$S_{sa}(1.7)$	$M_{sm}(0.7)$	$M_m(0.6)$	$S_1(0.4)$	$S_2(0.4)$	$M_{sf}(0.3)$	$M_f(0.3)$
BUSN	$S_a(10.2)$	$S_{sa}(1.5)$	$M_{sm}(0.8)$	$S_2(0.8)$	$S_1(0.6)$	$SK_3(0.6)$	$M_m(0.4)$	$K_1(0.3)$
MASN	$S_a(11.0)$	$S_{sa}(1.5)$	$S_1(1.0)$	$S_2(1.0)$	$SK_3(1.0)$	$M_{sm}(0.9)$	$M_2(0.5)$	$2MS_6(0.4)$
TONY	$S_a(10.7)$	$S_{sa}(1.5)$	$S_2(1.2)$	$S_1(1.0)$	$SK_3(0.9)$	$M_{sm}(0.9)$	$M_2(0.5)$	$T_2(0.4)$
YOSU	$S_a(11.4)$	$S_{sa}(1.6)$	$S_2(1.5)$	$SK_3(1.0)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.8)$	$M_2(0.7)$	$2MS_6(0.5)$
GOHG	$S_a(11.7)$	$S_{sa}(1.7)$	$S_2(1.5)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.9)$	$SK_3(0.8)$	$M_2(0.6)$	$H_1(0.5)$
KOMU	$S_a(10.7)$	$S_{sa}(1.5)$	$S_2(1.4)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.7)$	$M_2(0.6)$	$SK_3(0.6)$	$R_2(0.3)$
SEOS	$S_a(10.5)$	$S_{sa}(1.4)$	$S_2(1.0)$	$M_{sm}(1.0)$	$M_2(0.6)$	$S_1(0.5)$	$SK_3(0.4)$	$M_f(0.4)$
SOGW	$S_a(10.0)$	$S_{sa}(1.3)$	$S_2(1.2)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.5)$	$M_2(0.5)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.3)$
MOSL	$S_a(10.5)$	$S_{sa}(1.4)$	$S_2(1.2)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.5)$	$M_2(0.5)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.4)$
JEJU	$S_a(10.7)$	$S_{sa}(1.4)$	$S_2(1.1)$	$M_{sm}(1.0)$	$M_2(0.7)$	$S_1(0.5)$	$M_f(0.4)$	$SK_3(0.4)$
CHUJ	$S_a(11.3)$	$S_{sa}(1.6)$	$S_2(1.4)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.7)$	$M_2(0.7)$	$M_f(0.3)$	$SK_3(0.3)$
WAND	$S_a(11.7)$	$S_2(1.7)$	$S_{sa}(1.7)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.7)$	$SK_3(0.6)$	$M_2(0.6)$	$M_{sf}(0.4)$
JIND	$S_a(11.9)$	$S_2(1.6)$	$S_{sa}(1.6)$	$M_{sm}(1.0)$	$S_1(0.9)$	$M_2(0.6)$	$M_f(0.3)$	$H_1(0.3)$
DAEH	$S_a(12.2)$	$S_{sa}(1.7)$	$S_2(1.6)$	$S_1(1.1)$	$M_{sm}(1.0)$	$M_2(0.7)$	$M_f(0.4)$	$M_{sf}(0.4)$
MOKP	$S_a(12.3)$	$S_2(2.0)$	$S_{sa}(1.6)$	$H_1(1.4)$	$H_2(1.3)$	$S_1(1.1)$	$M_{sm}(1.0)$	$M_2(0.7)$
YONG	$S_a(12.1)$	$S_2(3.4)$	$S_{sa}(1.4)$	$M_{sm}(1.1)$	$S_1(1.0)$	$M_2(1.0)$	$H_1(0.6)$	$H_2(0.5)$
WIDO	$S_a(12.6)$	$S_2(3.2)$	$S_{sa}(1.5)$	$S_1(1.3)$	$M_{sm}(1.1)$	$M_2(1.0)$	$H_1(0.5)$	$H_2(0.4)$
KSOT	$S_a(13.0)$	$S_2(3.7)$	$S_{sa}(1.4)$	$S_1(1.3)$	$M_{sm}(1.2)$	$M_2(1.1)$	$H_1(0.8)$	$MS_4(0.7)$
JANH	$S_a(13.0)$	$S_2(3.9)$	$S_{sa}(1.4)$	$M_{sm}(1.2)$	$M_2(1.1)$	$S_1(1.1)$	$H_1(0.9)$	$MS_4(0.8)$
BORG	$S_a(13.6)$	$S_2(3.6)$	$S_{sa}(1.5)$	$S_1(1.3)$	$M_{sm}(1.2)$	$M_2(1.1)$	$H_1(0.8)$	$H_2(0.7)$
ANHG	$S_a(13.6)$	$S_2(3.3)$	$S_{sa}(1.5)$	$S_1(1.4)$	$M_2(1.2)$	$M_{sm}(1.2)$	$H_1(0.6)$	$M_{sf}(0.5)$
DAES	$S_a(13.7)$	$S_2(4.1)$	$M_2(1.7)$	$S_{sa}(1.3)$	$S_1(1.2)$	$M_{sm}(1.2)$	$H_1(1.0)$	$H_2(0.9)$
PYOT	$S_a(12.9)$	$S_2(5.4)$	$M_2(2.4)$	$H_1(2.2)$	$H_2(2.2)$	$S_{sa}(1.1)$	$M_{sm}(1.1)$	$MS_4(1.0)$
INCH	$S_a(14.0)$	$S_2(5.0)$	$M_2(2.1)$	$H_1(1.7)$	$H_2(1.6)$	$S_{sa}(1.3)$	$M_{sm}(1.2)$	$S_1(0.8)$

였으며, 인천 조위관측소에서는 14.0 cm로 전체 조위관측소 중 가장 큰 진폭을 보였다. 동해안은 S_a 분조 다음으로 S_{sa} 분조의 진폭이 1.6~1.8 cm으로 크게 나타났으나, 남해 서부 일부와 서해안에서는 S_2 분조의 비중이 증가하였다. 서해안은 다른 해역들에 비해 대체로 진폭이 컸으며, S_2 분조를 비롯한 단주기 분조의 비중이 증가하였다. 특히, 평택(PYOT) 조위관측소에서 S_2 분조의 진폭이 5.4 cm로 전체 조위관측소 중 가장 컸다.

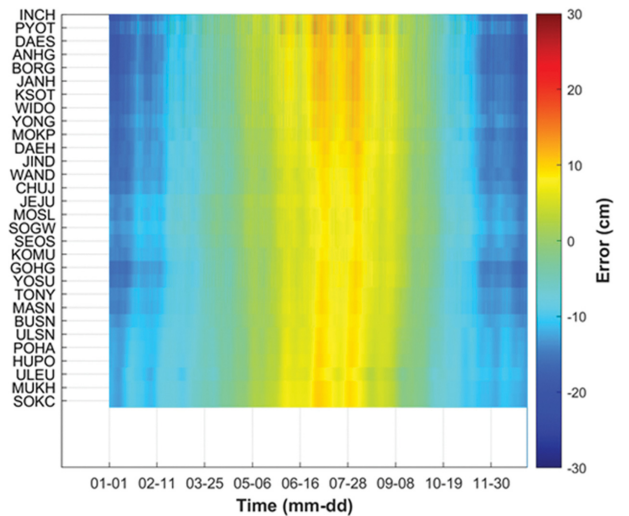
기상현상으로 인한 해일고의 계절변동이 총 수위에 미치는 영향을 알아보기 위해 Williams et al.(2018b)이 제안한 식(1)을 참고로 장주기 조석성분이 고려된 총 수위에서 해일고의 계절 성분을 제거하고, 보정 전후의 총 수위 오차를 비교하였다.

$$W_f = M_r - H_a + H_s \quad (1)$$

여기서 W_f 는 보정된 총 수위를 의미하며, M_r 은 조석·폭풍 해일 모델과 조석 모델의 차이인 해일고 예측 성분이다. 또한, H_a 는 해일고 예측결과를 조화분해한 결과이고, H_s 는 관측조위를 조화분해한 예측조위이다. 즉, 총 수위는 $M_r + H_s$ 로 정의되며, 여기에서는 LT02의 총 수위 자료를 사용하였다.

해일고에 반영된 기상현상의 영향을 살펴보기 위해서, Table

5에서 보인 해일고 조화분해 결과를 이용하여 2021년의 조위관측소별 계절 성분(H_a)을 계산하였다(Fig. 7). 전반적으로 우리나라 연안의 모든 조위관측소에서 대기압과 바람의 영향이 연 변동 규모에서 수위에 큰 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 7에서 나타난 강한 계절 성분은 예측조위

**Fig. 7.** Prediction from surge height harmonics (H_a) at 30 tidal stations along the coasts of Korea in 2021.

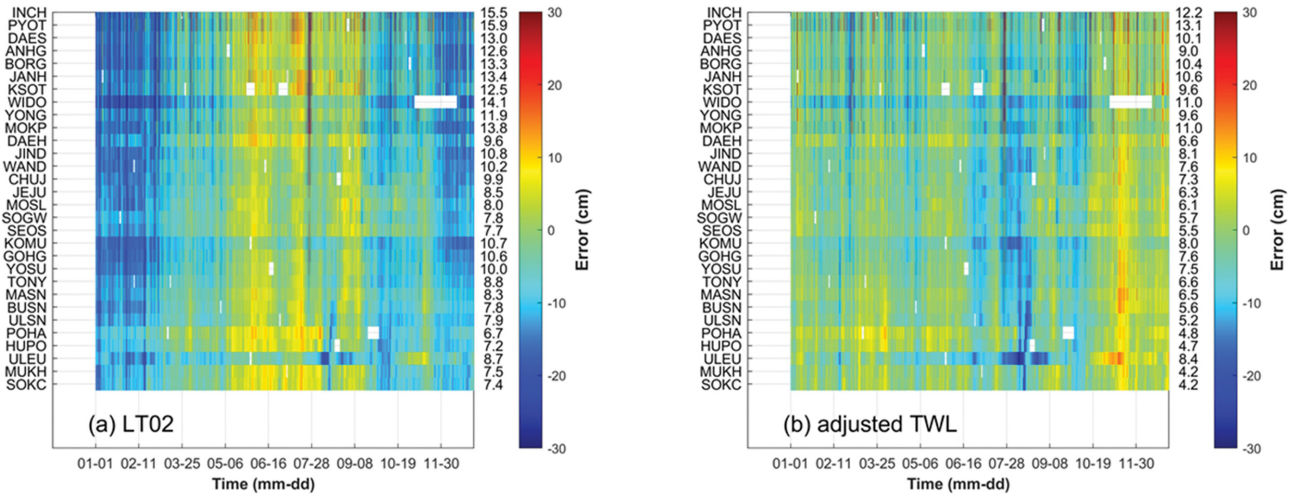


Fig. 8. Difference (cm) between the observations and (a) LT02, and (b) adjusted TWL at 30 tidal stations along the coasts of Korea in 2021. RMSE for each station is indicated on the right side of the plot.

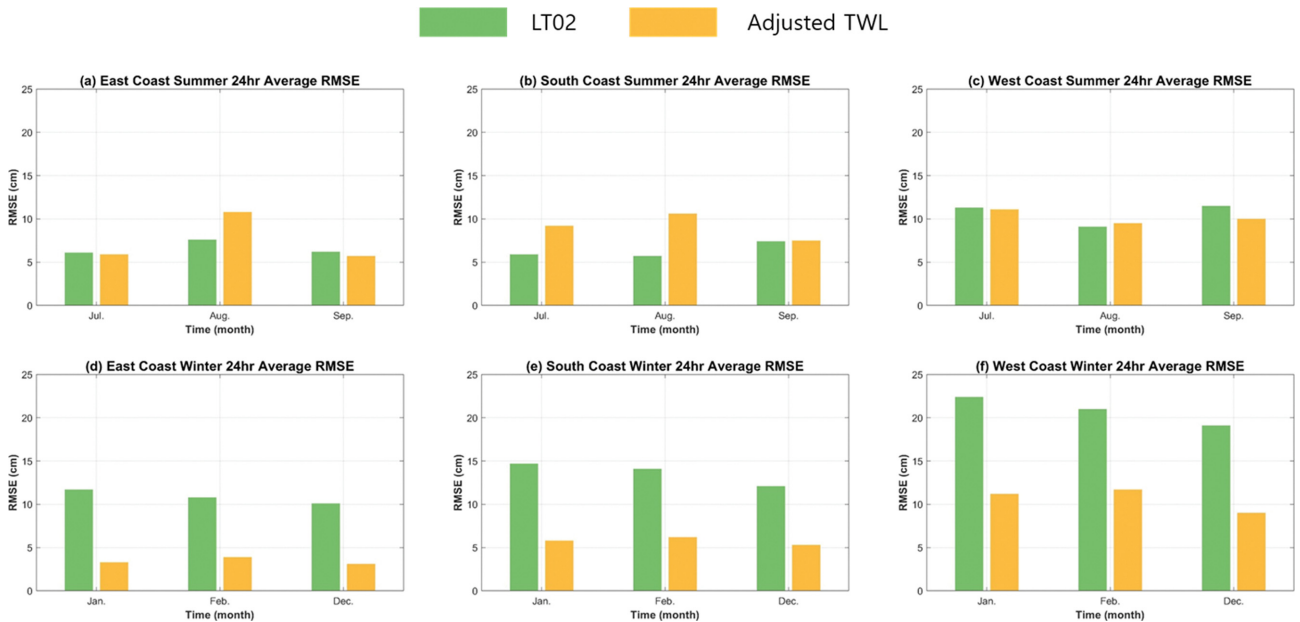


Fig. 9. 24 hr forecast RMSE for LT02 (green bars) and adjusted TWL (orange bars) in winter and summer of 2021.

의 장주기 성분(Fig. 4)과 유사한 주기를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 Table 5에서도 언급하였듯이, 서해안과 남해안에서 연주기 성분의 진폭이 상대적으로 크게 나타났다.

총 수위에서 해일고의 계절 성분(H_w)을 제거하여 이중으로 반영된 기상현상을 보정한 총 수위(W_t)를 생산하고, 관측조위와 보정 전후의 총 수위 간의 편차를 계산해 조위관측소별로 비교하였다(Fig. 8). Table 4에서도 언급하였듯이, 보정 전의 총 수위($M_t + H_s$)는 겨울철에 강한 음의 편차를 보이고, 여름철에는 약한 양의 값을 보이며 계절에 따른 오차의 차이가 크게 나타났다. 해역별로 보면 서해안과 남해안에서 겨울철 음의 편차가 강하고 상대적으로 동해안에서는 약하게 나타났다. 참고로 울릉 조위관측소에서는 모든 계절에서 음의 편차가 우세한 결과를 보였다. 해일고 예측에 반영된 기상현상을

보정한 총 수위(W_t)의 경우, 총 수위 편차의 계절적 경향이 사라지고 상대적으로 편차가 크게 낮아지는 결과를 보였다. 다만 여름철의 남해안에서는 보정 전보다 강한 음의 편차가 뚜렷해지는 결과를 보였다. 참고로 연평균 RMSE는 보정 후에 모든 조위관측소에서 유사한 폭으로 감소하였고, 감소폭은 평균 2.6 cm 정도로 나타났다.

실제 총 수위 예측을 가정하여, 24시간 예측자료에 대해 식 (1)과 동일한 방법을 적용하여 계절별로 RMSE를 살펴보았다(Fig. 9). 전반적으로 24시간 예측결과에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 먼저 여름철의 결과를 보면, 보정 전후의 평균 RMSE는 크게 변화가 없었으나, 특히 남해안에서 7월과 8월에 오차가 증가하였다. 동해안에서도 8월의 오차가 증가하였는데, 이는 울릉 조위관측소의 영향이 크게 작용한

결과이다. 겨울철에는 모든 해역에서 보정된 총 수위의 RMSE가 큰 폭으로 감소하였다. 동해안은 약 68%, 남해안은 약 57%, 그리고 서해안은 약 49%의 감소율을 보여, 동해안의 오차 감소율이 상대적으로 크게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라 연안의 30개 조위관측소에서 관측한 조위자료를 이용하여 연안에서의 장주기 조석성분의 특성과 장주기 조석성분 반영 여부에 따른 총 수위 예측 특성을 해역별로 살펴보았다. 장주기 조석성분은 연주조(S_a)와 반년주조(S_{sa})가 우세하게 나타났으며, 진폭은 평균적으로 각각 15.2 cm와 2.5 cm를 보였다. 해역별로는 서해안에서 약 17.8 cm로 상대적으로 큰 값을 보였다. 또한 관측자료의 기간에 따라 진폭과 지각에 차이가 있었는데, 진폭은 1 cm 이내의 차이를 보였으나 지각은 LT02가 LT01보다 약 75° 큰 값을 보였다. 한편 울릉 조위관측소와 장항 조위관측소는 관측자료 기간에 따라 S_a 와 S_{sa} 분조의 진폭 차이가 큰 것으로 나타나, 예측조위를 생성할 때 다년간의 관측자료를 조화분해하여 얻은 조화상수 값을 고려해 생성하는 것이 적절하다고 판단된다.

장주기 조석성분의 반영 여부와 관측자료의 기간에 따라 2021년에 대한 조위관측소별 예측조위를 생성하고, 여기에 수치모델에서 계산된 해일고 초기예측 결과를 더해 실험별 총 수위(NLT, LT01, LT02)를 생산하였다. 조위 관측자료와 비교 분석한 결과, 계절 특성이 뚜렷하게 나타났는데, 장주기 조석성분을 고려하지 않은 NLT 실험의 총 수위에 비해 장주기 조석성분을 고려한 실험(LT01, LT02)에서는 겨울철에 상대적으로 큰 오차를 보였으며, 여름철에는 상대적으로 작은 오차가 나타났다. 아울러, 2021년 태풍 오마이스가 내습한 시기에 동해안의 조위관측소에서의 총 수위를 살펴보았을 때, 모든 조위관측소에서 장주기 조석성분을 고려한 예측 총 수위가 관측조위와 비슷한 변동성을 보였으며, NLT는 강한 음의 편차를 보이며 상대적으로 예측성이 낮게 나타났다.

우리나라 연안에서 장주기 조석성분이 고려된 총 수위는 겨울철의 오차가 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 총 수위에 겨울철 기상현상(대기압, 바람)에 의한 수위 변동이 이종으로 반영되기 때문으로 판단된다. 실제로 해일고 예측결과를 조화분해하였을 때, 연안의 모든 조위관측소에서 기상현상에 의한 연주기 성분의 수위가 평균 11 cm의 진폭으로 가장 우세하였으며, 겨울철에는 낮고 여름철에는 높은 계절변동을 보이는 등 장주기 조석성분이 포함된 예측조위와 유사한 변동이 나타나는 것을 확인하였다. 아울러, 총 수위(LT02)에서 해일고의 계절 성분을 제거한 결과, 전반적으로 RMSE가 감소하였고, 특히 겨울철의 강한 음의 편차가 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타났다.

하지만 여름철의 경우, 남해안과 동해안에서 편차가 다소 커지는 경향을 보였다. Byun et al.(2021)은 해수면 고도에서

해면기압에 의한 영향을 제거한 성분이 해양 밀도변화에 의한 해수면 고도 성분과 상관성이 높다는 결과를 제시한 바 있다. 또한, Kim et al.(2021)은 하계 평균 해수면과 월별 수온 및 해면기압 변동의 상관성 분석을 통해 하계의 해수면 높이와 수온은 양의 관계가 있고, 해면기압은 음의 관계를 갖는 것을 보였다. 특히, 여름철에는 해면기압보다 수온이 더 높은 상관성을 가지는 것으로 분석한 바 있다. 기존 연구 결과를 바탕으로, 우리나라 연안의 여름철 수위 변동은 대기압과 더불어 해수 밀도에 따른 비부피 효과의 영향이 상대적으로 중요할 가능성이 있으며, 향후 본 연구 결과를 토대로 비부피의 영향이 반영된 수위 변동에 관해 추가 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. URL: http://topex.ucsd.edu/WWW_html/srtm30_plus.html.
- Bell, C., Vassie, J.M. and Woodworth, P.L. (1999). POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (TASK-2000). Permanent Service for Mean Sea Level, CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, U.K.
- Byun, D.S., Choi, B.J. and Kim H.W. (2019). Estimation of the Lowest and Highest Astronomical Tides along the west and south coast of Korea from 1999 to 2017. Journal of Korean Society of Oceanogr., 24(4), 495-508 (in Korean).
- Byun, D.S., Choi, B.J. and Kim H.W. (2021). Non-astronomical tides and monthly mean sea level variations due to differing hydrographic conditions and atmospheric pressure along the Korean Coast from 1999 to 2017. Journal of Korean Society of Oceanogr., 26(1), 11-36 (in Korean).
- Codiga, D.L. (2011). Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. University of Rhode Island Graduate School of Oceanography, Narragansett.
- Jeong, S.T., Cho, H.Y., Jeong, W.M. and Yang, J.S. (2005). Analysis on the occurrence probability distribution of tidal levels using harmonic constants. Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 25(1B), 51-57 (in Korean).
- Kang, S.K., Cherniawsky, J.Y., Foreman, M.G.G., So, J.K. and Lee, S.R. (2008). Spatial variability in annual sea level variations around the Korean peninsula. Geophysical Research Letters, 35(3), 1-7.
- Kang, J.W., Joo, Y.M., Cho, H. and Kweon, H.M. (2014). Spatio-temporal variability of AHHW in relation with the design sea level. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.,

- 26(2), 72-80 (in Korean).
- Kim, A.J., Lee, M.H. and Suh, S.W. (2021). Effect of summer sea level rise on storm surge analysis. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 33(6), 298-307 (in Korean).
- Ko, D.H., Jeong S.T. and Cho, H.Y. (2016). Analysis on the emersion and submersion patterns of the coastal zone in Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 28(5), 312-317 (in Korean).
- La, N.R., An, B.W., Kang, K.R. and Chang, P.H. (2020). Development and verification of NEMO based regional storm surge forecasting system. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 32(6), 373-383 (in Korean).
- Madec, G. and the NEMO team (2016). NEMO reference manual 3_6_STABLE: NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2007). Tidal Analysis and Prediction. National Ocean Service, Center for Operational Oceanographic Products and Services.
- Park, Y.H. and Park, W.S. (2021). Characteristics of storm surge by forward speed of typhoon in the South Coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 33(5), 187-194 (in Korean).
- Pugh, D.T. (1987). Tides, surges and mean sea level. John Wiley & Sons, New York.
- Williams, J., Irazoqui Apecechea, M., Saulter, A. and Horsburgh, K.J. (2018a) Radiational tides: their double-counting in storm surge forecasts and contribution to the Highest Astronomical Tide. *Ocean Science*, 14(5), 1057-1068.
- Williams, J., Saulter, A., O'Neill, C., Brown, J. and Horsburgh, K.J. (2018b) A reassessment of the UK operational surge forecasting procedure. National Oceanography Centre, Liverpool.

Received 11 November, 2022

Revised 1 December, 2022

Accepted 2 December, 2022