

기후변화 시나리오에 따른 울릉도 남양항의 설계수위 및 정온도 평가

Evaluation of Design Water Level and Harbour Tranquility at Namyang Port in Ulleungdo According to Climate Change Scenarios

권경환^{1,*}, 박창욱¹, 김종훈¹, 박지민¹Kyonghwan Kwon^{1,*}, Changwook Park¹, Jonghoon Kim¹, Jeemin Park¹¹[주]오서닉 해양환경 연구소¹Oceanic Pty, Ltd., Ocean Environment Institute, Seoul 07207, Republic of Korea*Correspondence to Kyonghwan Kwon
E-mail: kkhms1120@hotmail.com

Received April 27, 2023

Revised April 28, 2023

Accepted April 28, 2023

Abstract : With global warming, sea level rise is occurring along the coast of the Korean Peninsula and in island areas such as Ulleungdo. Rising sea temperatures supply more energy for tropical low-pressure system formation and increase wave energy invading the coast. As a result of increased typhoon intensity, various methods have been proposed to calculate design forces in coastal structure design. The Ministry of Oceans and Fisheries (2019) provides long-term wave output time series for the coast of Korean Peninsula. The time series dates from 1979 to 2019 and provides deep-water design waves for frequencies (10 years, 20 years, 30 years, 50 years, 100 years) at coastal grid points. Water level calculation is crucial for coastal structure stability and design wave calculations. Numerical models enable the estimation of wave distribution where measurement is challenging, and water level calculation within the model is vital for wave height and monthly volume calculation near the coast and structures due to wave deformation factors. This study aims to provide necessary design data by examining changes in still water level experiments according to design water level calculation methods proposed in port and fishery design standards in the Ulleungdo area where water level changes due to various weather and currents are greater those caused by tides.

Keywords : Global warming, Wave simulation, Design water level, Surge

서론

지구 온난화와 함께 발생하는 해수면 상승은 한반도의 해안 지역을 비롯하여 울릉도 등 도서 지역 전반에 걸쳐 진행 중이다. 또한 해수면의 온도 상승으로 인해 열대 저기압의 생성 시 에너지 공급이 커지며 연안으로 내습하는 파랑 에너지가 증가하게 된다. 최근 연안 구조물 설계 시 태풍 강도 증가에 따라 설계 외력 산정에 다양한 방법들을 제시하고 있으며, Ministry of Oceans and Fisheries (2019)는 1979년~2019년까지 한반도 연안의 장기파랑 산출 시계열을 제공하며, 연안 격자점에서 빈도별(10년, 20년, 30년, 50년, 100년)에 대한 심해 설계파를 제공하고 있다. 설계파 산정과 함께 수위의 산정은 구조물의 안정성에 중요한 인자이다. 연안 설계파 산정 및 월파랑 계산에 주로 사용하고 있는 수치 모형실험은 예측이 힘든 공간적인 파랑 분

포를 추산할 수 있는 장점이 있다. 파랑 변형 수치 모형실험 시 수위의 산정은 연안에서의 파랑 변형에 기인하는 다양한 요인 중 해안선 및 구조물 인근에서의 파고 및 월파랑 계산에 중요한 변화 인자가 된다. 본 연구에서는 조석에 의한 수위 변화보다 다양한 기상 및 해류의 영향에 의한 수위 변화가 큰 울릉도 인근 해역에서 항만 및 어항 설계기준에 제시된 설계수위 산정 방법별 항내 정온도 실험의 변화를 검토하여 설계에 필요한 자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

연구 방법

울릉도 남양항의 정온도 실험을 위해 내습하는 파랑의 전파 계산과 설계수위를 산정하였다. 파랑 계산을 위해 울릉도 남양

항에 영향을 준 것으로 판단되는 1979년부터 2020년까지의 한반도 인근 해역에 내습한 태풍(기상청 태풍센터) 중 18개의 태풍 사상을 대상으로 JMA(일본기상청)에서 제공하는 후측 바람 계산 자료를 활용하여 수치 모형실험을 수행한다. 계산된 최대 파랑 계산 결과를 바탕으로 울릉도 남양항에 영향을 준 것으로 판단되는 태풍 사상에 대하여 상세역에서의 정온도 실험을 수행한다.

정온도 실험에 사용되는 설계수위는 항만 및 어항 설계기준에서 제시한 방법을 이용하며, 연안의 외곽시설 건설 시 설계수위의 산정 방법에 따른 항내 정온도의 변화와 범람 변화에 대해 수치 모형실험을 이용하여 검토한다.

1. 설계수위 산정 방법

항만 개발 중 외곽시설은 항 정온도 유지, 배후부지의 방재, 연안 구조물의 보호 등의 목적으로 건설된다. 외곽시설의 설계 외력으로는 파랑, 수위를 들 수 있으며, 이 중 설계조위의 결정

은 파랑 변형 실험의 내습파의 실험 조건과 방파제의 마루높이 산정에 중요한 요인으로 작용한다.

설계조위의 결정은 항만 및 어항 설계기준에 따라 천문조와 폭풍해일, 지진해일 등에 의한 이상조위의 실측값 또는 추산값에 기초하여 정하는 것으로 제시하고 있다. 그리고 설계조위는 “구조물이 가장 위험하게 되는 조위”로 한다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014). 설계조위 산정 방법 중 고극조위는 국립해양조사원에서 조사하는 연간 고극조위를 분석하여 최대값으로 산정된 최극조위를 사용하는 방법이다. 두 번째 방법은 연 관측 최대조위의 극치 분석을 통해 산출된 50년 빈도 설계조위를 사용하는 방법이다. 세 번째는 4대 분조로 분석한 약 최고고조위와 폭풍해일고를 더하여 산정하는 방법이다.

울릉도를 포함한 동해안의 경우 주요 4대 분조 이외에도 MF, MSF 등과 같은 장주기 성분과 기상조에 의한 수위 변화가 4대 분조의 합보다 크게 나타난다. 특히 태풍 내습 시는 기압장의 영향으로 해일고의 영향이 크고, 동해는 계절에 따른 해수의 체적 변화로 계절적인 연간 평균해수면 변화가 큰 지역이다. 최근 기후변화에 따른 해수면 온도변화로 해수면의 상승고에 대한 연구가 진행되고 있고, 고해상도 후측 수치 모형 계산으로 울릉도 해역이 한반도 주변 해역 중 지구 온난화의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

울릉도 조위 관측소의 최극조위(Korean Hydrographic and Oceanographic Agency)를 보면 105 cm로 나타났으며, 이를 통한 빈도별 수위 극치 분석 결과를 Table 1에 제시하였다. 조위 관측소에서 계측된 최극조위는 50년 재현 빈도의 고극조위인 것으로 나타났으며, 이는 조석주요 4대 분조로 산정되는 Table

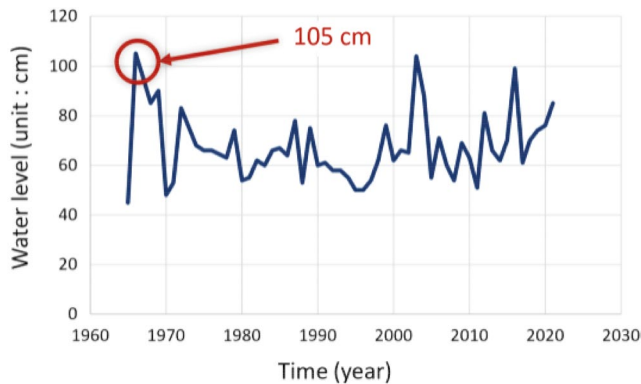


Fig. 1. The highest astronomical tide observed at Ulleungdo Tide Gauge Station (National Institute of Oceanography).

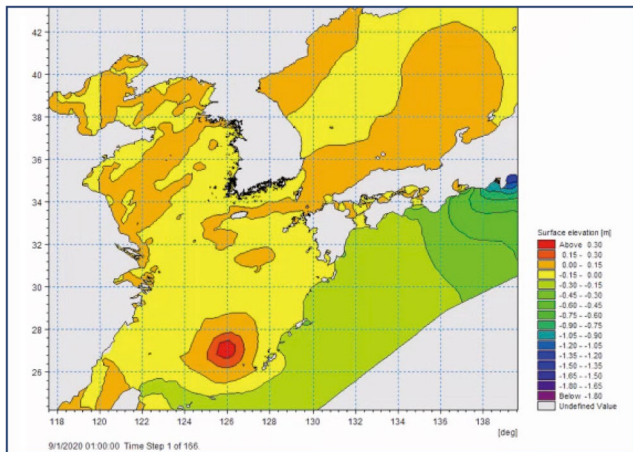


Fig. 2. The water level rise during the approach of Typhoon Maysak.

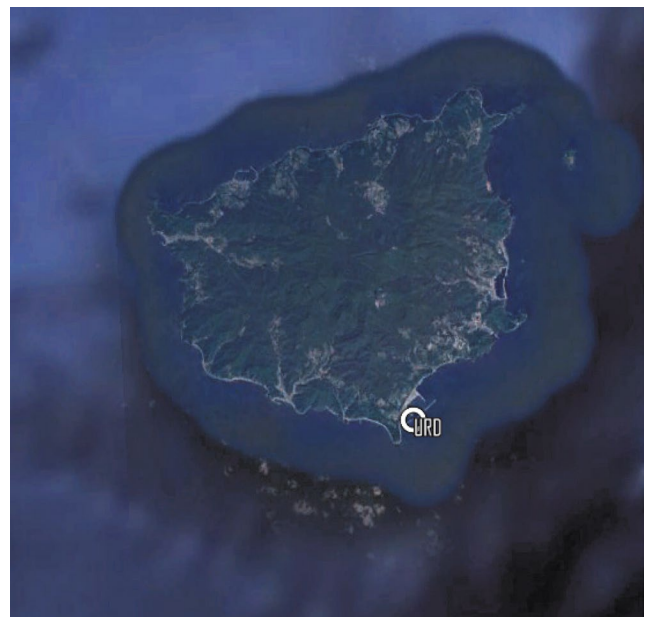


Fig. 3. The verification locations for water level.

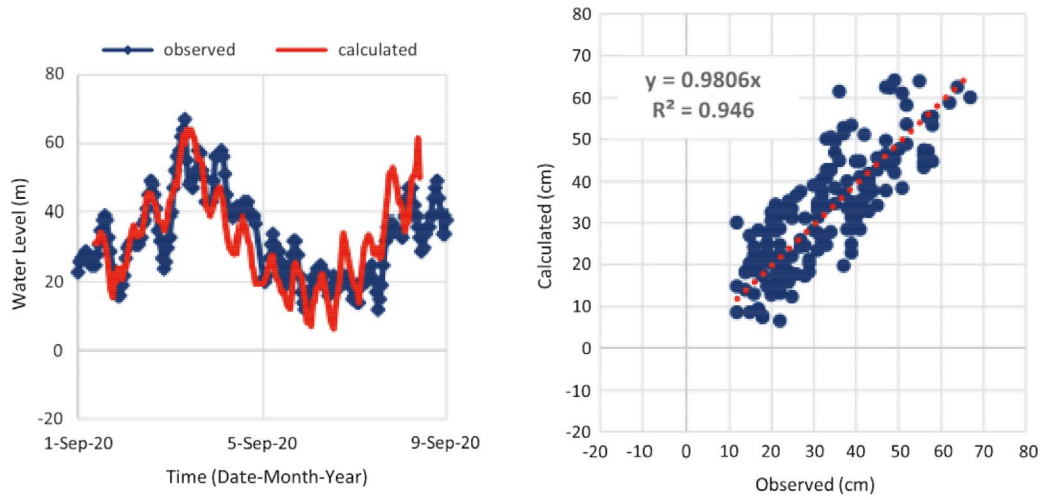


Fig. 4. Water level verification during the approach of Typhoon Maysak.

Table 1. The analysis results of extreme water levels at Ulleungdo Tide Gauge Station

	Gumbel				
	FT-I	k=0.75	k=1.00	k=1.4	k=2.0
Correlation	0.99	0.94	0.98	0.99	0.99
Sum square of residuals	0.04	0.44	0.18	0.04	0.08
Recurrence interval (years)	Level (cm)	Level (cm)	Level (cm)	Level (cm)	Level (cm)
2	65	62	63	64	65
5	77	73	76	78	79
10	86	83	85	87	86
25	96	98	98	97	95
50	104	110	108	105	100
73	108	117	114	109	103
100	112	123	118	112	105

Table 2. The harmonic constants and approximate highest astronomical tide at Ulleungdo Tide Gauge Station

Components	Classification	
	Amplitude (cm)	Phase (deg)
M2	5.4	81.2
S2	1.5	96.1
K1	4.7	348.5
O1	4.3	317.5
Approximate highest astronomical tide	31.6	—

2의 약최고조위에 비해 3배 이상 높은 값이다.

설계조위 산정을 위해 금회 연구에서는 수치해석을 이용하여 전구 기압 후측 실험 결과에 의한 해수면 변동을 반영하여

Table 3. Verification of water levels during the passage of Typhoon Maysak

	R ²	R
Verification of design water level including storm surge and storm tide (actual water level)	0.946	0.805

수위 계산을 수행하였다. 수치 모형실험을 이용하여 폭풍해일고를 산정하기 위해 전구 후측모형의 바람 및 기압 산정 결과를 이용하여 공간적인 기압, 바람과 조석 경계 조건을 입력값으로 하는 모형을 구축하여 울릉도 남양항의 폭풍해일고 계산을 수행하였다.

기상청, 유럽 중기예보 센터(ECMWF), 미국 국립기상국(NCEP), 일본기상청(JMA) 등의 다양한 기관에서는 기상 후측

Table 4. Experimental plan for design water level variations

Water level conditions	
CASE-A	0.316 m (approximate highest astronomical tide)
CASE-B	1.050 m (extreme high tide)
CASE-C	0.316 m + 0.650 m = 0.966 m (approximate highest astronomical tide + storm surge)
CASE-D	0.796 m + 1.050 m = 1.846 m (RCP's 2100 sea level rise + storm extreme high tide at Ulleungdo)

Table 5. Experimental summary

Division	Contents
Elements numbers	33,290 ea
Vertical layer	10 layers
Mesh size	1.7~100.0 m ²
Simulation time/ system processing time	10 min/ 72 min (Ryzen threadripper3970 32Core)
Incoming wave	Irregular wave, JONSWAP Spectrum Hs: 9.3 m , Tp:13.5 s, Dir: SSW

실험 결과가 공개되고 있으며, 이를 바탕으로 한반도 주변 해역의 파랑, 흐름, 조위, 기상에 의한 해일고를 모의하는 연구 사례가 증가하고 있다. 최근 계산 CPU의 발전과 GPU의 활용 등으로 계산시간이 비약적으로 발전하여 다양한 인자를 동시 계산할 수 있는 수치 기법의 활용이 가능하게 되었다. 금회 연구에서는 MIKE Package (Danish Hydraulic Institute, 2017, 2023)를 이용하여 폭풍해일고를 산정하였으며, MIKE는 통합 외력에 의한 자연현상을 모의하기에 적합한 파랑, 유동, 강우, 지하수 등이 결합한 모형이다.

남양항에 최근 내습한 마이삭-하이선 영향 기간의 공간적인 기압과 바람장을 입력값으로 하여 조석-해일고 통합모형의 계산을 수행하였으며, Table 3과 Fig. 5는 남양항 인근에 위치한 울릉도 조위 검조소 관측 자료와 계산 시계열을 비교하였다. 계산 결과와 관측 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 폭풍해일 계산 결과 중 울릉도 남양항의 연구 대상 지역의 최대 폭풍해일고는 0.650 m로 나타났다.

2. 항내 정온도 수치 실험

위에서 제시한 수위 기준들에 따라 남양항의 정온도 변화 양상을 검토하였다. 실험안은 4가지의 수위 조건에 대하여 검토하였으며, Case 1은 약최고조위 조건에서 실험을 수행하고, Case 2는 고극조위 조건에서 실험을 수행하였다. Case 3은 약최고조위와 폭풍해일고를 더한 조건이고 Case 4는 지구 온난화 시나리오의 울릉도의 해수면상승고와 고극조위를 더한 조건

으로 실험을 수행하였다.

울릉도 남양항의 정온도 해석을 위해 비정수압 모형인 MIKE 3 Wave FM (DHI) 모형을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모형의 개요는 Table 5와 같으며, 파랑의 입력재원은 마이삭-하이선 태풍 내습 시 모의한 광역 파랑 변형 수치 모형실험에서 추출하여 전면에 내습 파랑 조건을 결정하였다. 입사파의 제원은 파고 9.3 m, 주기 13.5 s이며, JONSWAP Spectrum의 불규칙파를 사용하였으며, 불규칙파의 파형이 충분히 모의할 수 있게 10분간 연속적으로 조파하여 계산을 수행하였다.

실험 결과

약최고조위 조건에서 남양항 인근에서 계산된 유의파고의 최댓값에 대한 분포를 보면 방파제 전면에서 일부 8.5 m의 파고를 확인할 수 있고, 동측 해안에서 5.0~6.0 m의 파고를 확인할 수 있다.

수위 조건을 변경할 경우 연안에서 파고 증가에 대한 변화에 대해 Case-B~Case-D 실험안을 통하여 검토하였다. 실험 결과 폭풍해일 고극조위 조건인 Case-B의 경우 방파제 전면 부근 및 동측 해변에서 최대 0.5 m의 유의파고 증가를 확인할 수 있었다. 지구 온난화로 인한 해수면 상승고와 약최고조위를 더한 실험안인 Case-C에서는 연안 부근에서 최대 1.1 m의 유의파고 증가를 확인할 수 있다. 지구 온난화로 인한 해수면 상승고와 최고극조위를 반영한 실험인 Case-D의 경우 최대 1.8 m의 파고 증가를 확인할 수 있었다.

결론 및 고찰

최근 설계 기준서에서 과업 대상지의 중요성 및 구조물의 특성에 맞는 설계를 위해 태풍을 이용한 바람장을 이용한 설계파 산정을 제안하고 있다. 특히 울릉도 주변 해역은 지구 온난화로 인한 해수면 상승고가 한반도 주변 해역에서 가장 큰 것으로 나타나며, 이에 따른 설계수위의 검토가 반드시 필요할 것

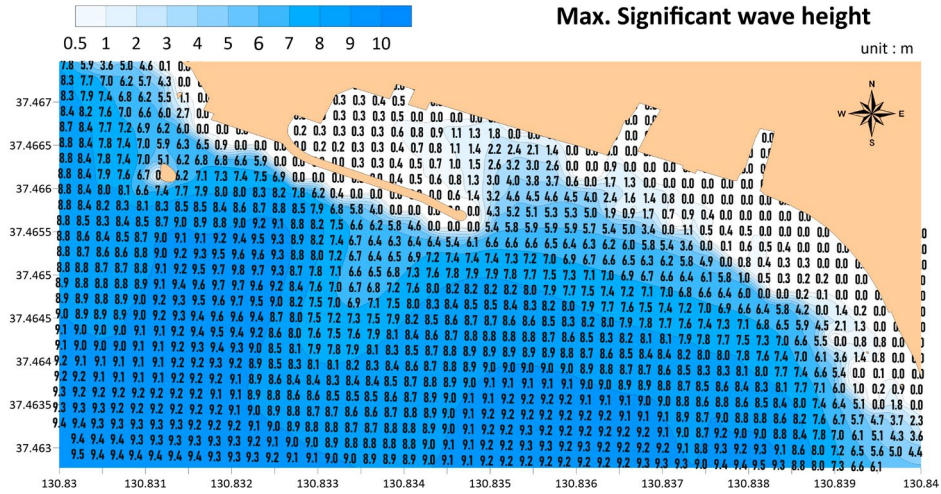


Fig. 5. Significant wave height calculation results (Case-A).

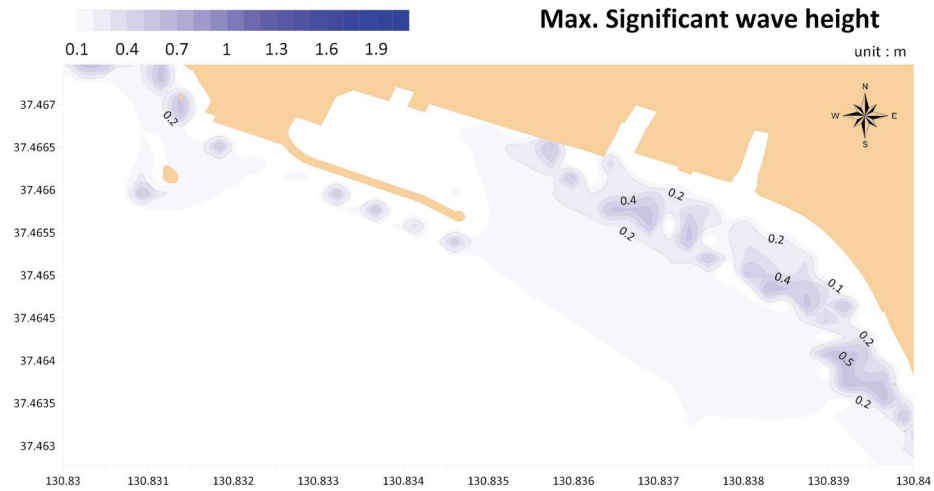


Fig. 6. Difference in significant wave height between Case-A and Case-B.

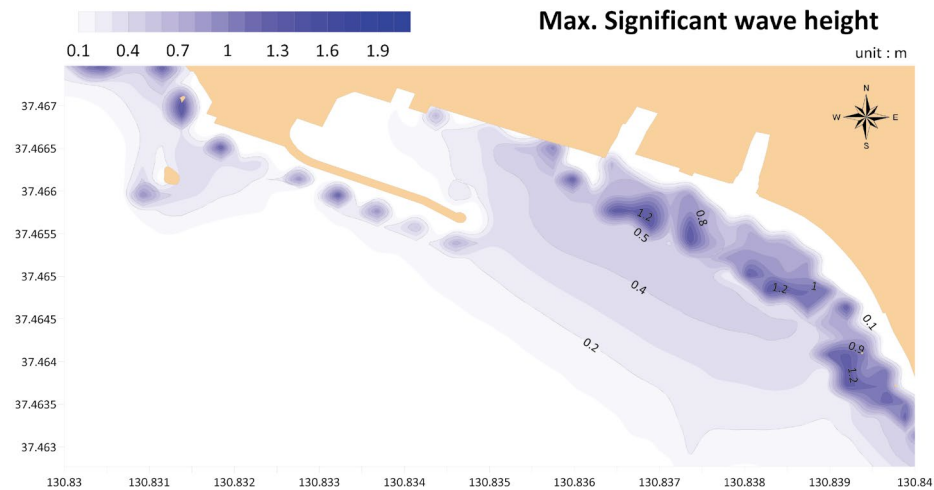


Fig. 7. Difference in significant wave height between Case-A and Case-C.

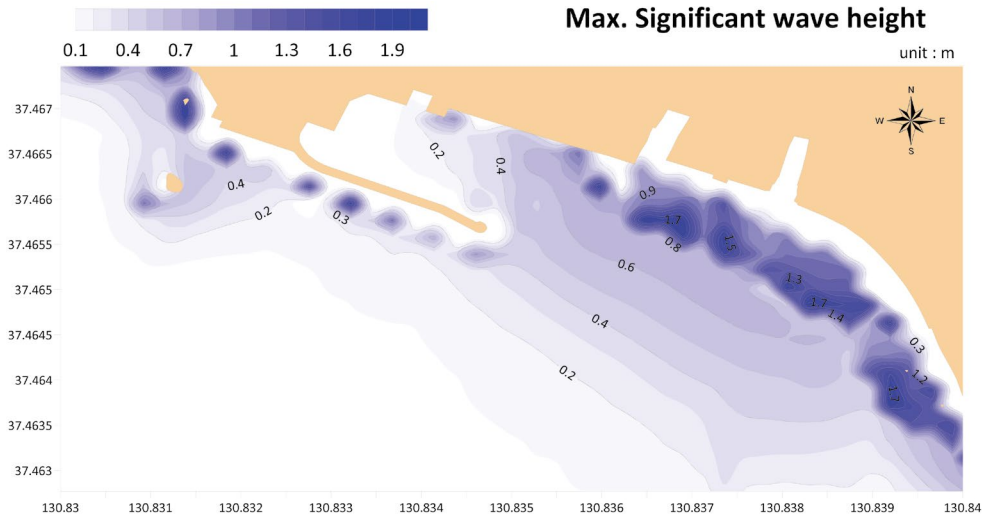


Fig. 8. Difference in significant wave height between Case-A and Case-D.

으로 판단된다. 설계수위 조건 변화에 따라 지구 온난화에 의한 상승분을 반영하게 되면 기존 약최고고조위 실험 조건 대비 최대 1.7m의 파고 증가 구간이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 월파 방지 및 파랑 차폐의 목적으로 건설되는 구조물 건설 시 구조물의 규모 및 천단고를 결정하는 데 설계수위는 중요한 요인이다. 따라서 해안 방파제 건설 시 이러한 설계수위의 검토가 면밀히 선행 검토되어야 할 것으로 판단된다. 특히 동해안의 경우 전체 수괴의 체적이 크고 해류의 영향을 크게 받는 지역으로 지구 온난화로 인한 해수면의 상승 영향이 남해안과 서해안에 비해 큰 지역으로 연구되고 있다. 따라서 구조물 설계 시 지구 온난화에 의한 해수면 상승고를 반영한 설계파, 정온도 및 월파랑 산정이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- Danish Hydraulic Institute, 2017. MIKE 21&3 Flow Model FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation.
- Danish Hydraulic Institute, 2023. MIKE 3 Wave FM Hydrodynamic module Scientific Documentation.
- Korean Hydrographic and Oceanographic Agency, Ulleng-do Tidal Station Open Data. <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/gis/category/reference/distribution.do>.
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2014. Ministry of Oceans and Fisheries Harbour and Fishing Port Design Standard, Korea Ports & Harbours Association.
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2019. National Deep Sea Design Wave Calculation Report.