

태풍 내습 시의 고파 재현성 개선방안 연구

A Study on the Methods to Improve High-Wave Reproducibility during Typhoon

백종대* · 류경호** · 이종인*** · 정원무**** · 장연식*****

Jong-Dai Back*, Kyong-Ho Ryu**, Jong-In Lee***, Weon-Mu Jeong**** and Yeon-S. Chang*****

요 지 : 본 연구는 2020년 해양수산부에서 제시한 개정된 천해설계과 추산방법인 바람장을 이용하여 부산항 신항을 대상으로 태풍 내습 시 설계파를 추산하고 파랑 관측자료와의 검증을 통해서 신뢰할 수 있는 천해설계과 산출방법을 제안하였다. 부산항 신항에 영향을 미친 태풍에 대해서 현장에서 일반적으로 많이 사용하고 있는 태풍 바람장과 SWAN 수치모델을 이용하여 태풍파를 추산한 결과 태풍 KONG-REY(1825), MAYSAK(2009)을 제외하고 재현성이 불량한 것으로 나타났다. 특히 부산항 신항에 가장 크게 영향을 미쳤던 태풍 MAEMI(0314)의 경우 최대유의 파고가 파랑 관측치에 비해서 약 35.0% 작게 추산되었다. 이에 바람장을 보정한 방법과 Boussinesq 방정식 수치모델을 이용하는 방법을 각각 적용하여 태풍파 재현성 개선방안을 검토하였다. 검토결과 바람장을 보정한 경우는 바람장 보정전과 동일하게 재현성이 떨어지는 것으로 나타났으나, 바람장 자료와 SWAN 모델 실험결과 그리고 Boussinesq 수치모델을 연계하는 방법으로 태풍 MAEMI(0314) 내습 시 태풍파를 추산한 결과 파랑 관측치와 최대유의파고가 유사하게 나타나 재현성이 양호한 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 부산항 신항, 천해설계과, 바람장, 파랑추산, 파랑 관측자료

Abstract : This study estimates the design wave in the event of a typhoon attack at Busan new port using the wind field, the revised shallow water design wave estimation method proposed by the Ministry of Oceans and Fisheries in 2020, and proposed a reliable method of calculating the shallow water design through verification with the wave observation data. As a result of estimating typhoon wave using the wind field and SWAN numerical model, which are commonly used in the field work, for typhoon that affected Busan new port, it was found that reproducibility was not good except typhoons KONG-REY(1825) and MAYSAK(2009). In particular, in the case of typhoon MAEMI(0314), which had the greatest impact on Busan new port, the maximum significant wave height was estimated to be about 35.0% smaller than that of the observed wave data. Therefore, a plan to improve the reproducibility of typhoon wave was reviewed by applying the method of correcting the wind field and the method of using the Boussinesq equation numerical model, respectively. As a result of the review, it was found that the reproducibility of the wind field was not good as before when the wind field correction. However as a method of linking wind field data, SWAN model results, and Boussinesq numerical model, typhoon wave was estimated during typhoon MAEMI(0314), and the maximum significant wave was similar to the wave observations, so it was reviewed to have good reproducibility.

Keywords : busan new port, shallow water design wave, wind field, wave hindcasting, wave observation data

1. 서 론

최근 지구 온난화로 인해 해수면 상승과 더불어 대형 태풍의 발생이 빈번해지고 있으며 이로 인해 우리나라의 연안 및 항만 구조물 설계 시에도 이러한 기후변화의 영향을 반영할

필요가 제기되었다. 우리나라는 1970년대부터 2018년까지 빈도별 심해설계과와 파랑변형 수치모델을 활용하여 구조물 위치까지 너울로 전파하는 파랑을 재현한 후 이를 구조물 설계 파로 결정하여 사용해왔다. 이와 같은 방법은 태풍 발생 시 수시로 변화하는 바람의 영향을 고려하기 어려우며, 빈도별

*(주)해안해양기술 상무(Senior Engineer, Coast and Ocean Technology Research Institute)

**한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 연구원(Corresponding author: Kyong-Ho Ryu, Researcher, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385 Haeyang-ro, Yeosu-si, Jeonnam 59111, Korea. Tel: +51-664-3569, ryukh75@kiost.ac.kr)

***전남대학교 공과대학 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam National University)

****한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원(Principal Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

*****한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원(Principal Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

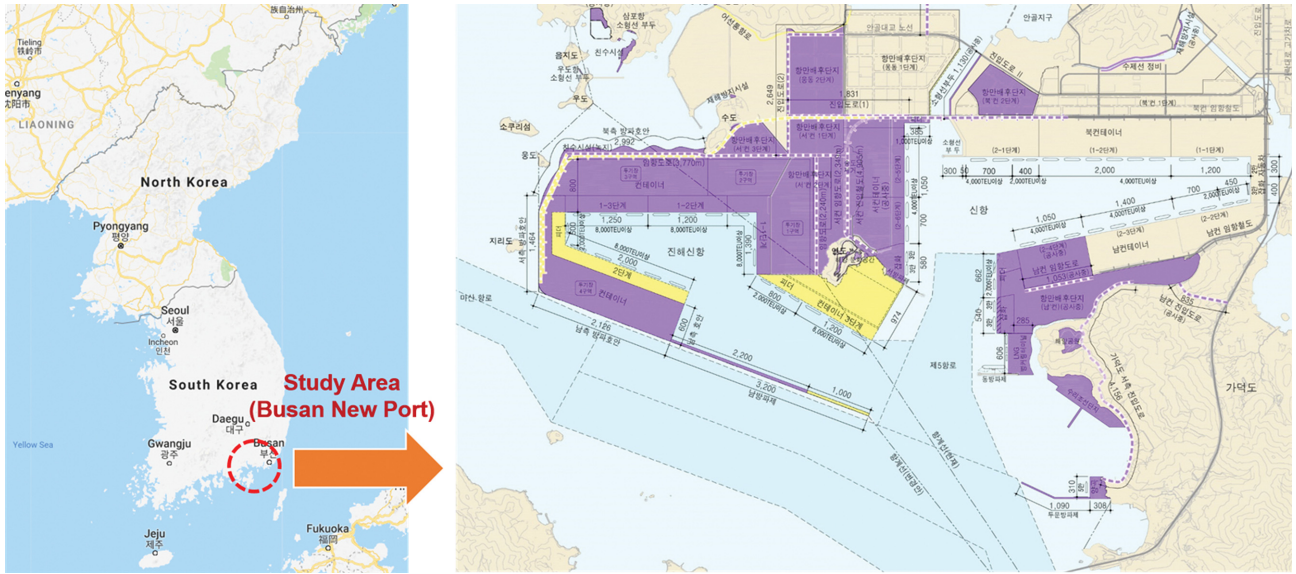


Fig. 1. Topographic map of the study area.

심해설계와 산정을 위한 극치분석 과정에서 자료의 수가 부족한 태풍의 영향이 제외되는 등 근본적인 문제점을 가지고 있었다. 이와 같은 빈도별 심해설계과를 이용한 설계와 추산 방법의 문제점을 개선하기 위해 2019년 해양수산부에서는 파랑 실측자료를 이용하는 방법과 바람장을 이용한 설계와 추산방법을 제안하였다(해양수산부, 2019). 태풍 시 바람장의 경우 기압장과 바람장을 태풍의 이동경로, 중심부 기압, 최대풍 반경, 최대 풍속 등의 몇 가지 태풍 파라미터만을 제공하는 Best track 정보를 이용하여 구하는 것이 일반적이었으나(Suh and Kim, 2012; Ku et al., 2019; Kim and Suh, 2019), 최근에는 특정 지역에 대한 기상장을 얻을 수 있어 이를 직접 이용하는 방법(Kwon et al., 2020)이 널리 사용되고 있다. 또한 우리나라 주변의 바람자료를 포함한 기상장으로 사용 가능한 바람장들의 비교 연구도 활발하게 이루어지고 있다(Kim et al., 2020; Kwon et al., 2020; Yoon et al., 2020).

본 연구에서는 부산항 신항을 대상으로 “전국 심해설계과 산출 보고서(해양수산부, 2019)”와 “항만 및 어항설계기준 및 해설(해양수산부, 2020)”에서 제시하는 방법을 적용하여 태풍과 재현을 통한 부산항 신항의 천해설계과를 추산하고 개선방안을 제시하고자 하였다. 태풍과 재현 수치실험 결과는 우리나라 주변 외해에서 관측한 파랑자료와 부산항 신항 인근의 근해 파랑 관측자료와의 비교를 통해서 검증하였다.

연구대상지는 우리나라 항만물동량 1위를 기록하고 있으며, 주변 해역에서의 관측자료 확보가 가능한 부산항 신항으로 선정하였다. 부산항 신항은 1995년부터 기존 부산항의 화물적체를 해소하고 동북아시아의 국제 물류 및 비즈니스 중심항만을 구축하기 위해서 건설이 진행 중이며, 2030년까지 서컨테이너부두, 진해신항 등이 건설 및 계획되어 있다. 부산항 신항은 하계 및 추계 태풍의 주요 이동 경로인 남해안 동부지

역에 위치하고 있어 신뢰할 수 있는 구조물 설계과 산정이 안전한 항만 건설을 위해서 매우 중요한 신항만이다(Fig. 1 참조). 이를 위해 부산항 신항에 악영향을 미친 태풍을 대상으로 수치모형실험을 수행하여 태풍 내습 시의 파랑을 추산하고 파랑 관측자료와의 검증을 통해 수치모형실험의 재현성을 확인하였다. 또한 부산항 신항의 파랑추산 재현성 개선을 위한 방안을 제안하고 파랑 관측자료와의 비교·검증을 통해 개선방안의 적정성을 확인하였다. 한편, 부산항 신항에서는 과거 태풍 MAEMI(0314) 내습 시 고파와 강풍으로 인해 방파제, 컨테이너 시설 등에 피해가 발생하였으며, 피해가 발생한 동방파제 인근에서 한국해양과학기술원이 파랑관측을 수행한 바 있다. 또한 2006년 이후 현재까지 부산항건설사무소와 한국해양과학기술원에서 부산항 신항 주변에서 파랑 관측을 수행하고 있어 태풍 시 파랑 관측자료 확보에 유리한 지역이다.

2. 바람장 및 파랑 관측자료 수집

2.1 바람장

부산항 신항을 대상으로 바람장을 이용한 설계과를 추산하기 위해서 연구대상지에 기준에 내습하여 영향을 미친 태풍과 그 기간을 검토하였다. “전국 심해설계과 산출 보고서(해양수산부, 2019)”에서 수행한 1959년에서 2016년까지 우리나라에 영향을 미친 193개 태풍과 모의결과를 이용하여 1959년 내습한 태풍 SARAH(5914)부터 부산항 신항 해역에 영향을 미친 것으로 추정되는 21개 태풍 이벤트를 선정하였다. 또한, 2017년 이후 내습하여 부산항 신항에 영향을 미친 태풍 KONG-REY(1825), LINGLING(1913), BAVI(2008), MAYSACK(2009), HAISHEN(2010) 등 5개 태풍을 추가하여 총 26개 태풍을 선정하고, 태풍 시 바람장의 기간을 Table 1에 정리하였다.

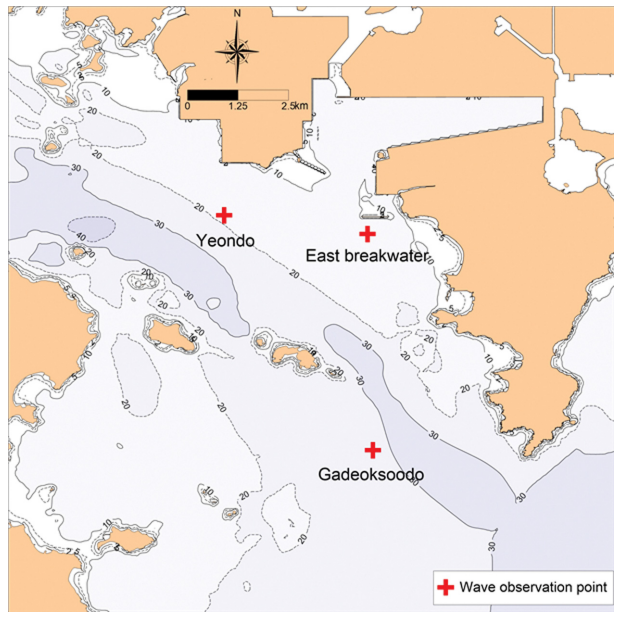
Table 1. Typhoon event of Busan New Port.

Typhoon			Typhoon		
Typhoon		Period	Typhoon		Period
5914	SARAH	1959.09.11.~09.18.	0205	RAMMASUN	2002.07.01.~07.07.
6210	OPAL	1962.08.03.~08.09.	0215	RUSA	2002.08.25.~09.01.
7119	OLIVE	1971.07.30.~08.06.	0314	MAEMI	2003.09.06.~09.14.
7209	TESS	1972.07.20.~07.24.	0415	MEGI	2004.08.15.~08.20.
7911	JUDY	1979.08.17.~08.26.	0603	EWINIAR	2006.07.03.~07.11.
8613	VERA	1986.08.21.~08.29.	1004	DIANMU	2010.08.08.~08.12.
8705	THELMA	1987.07.10.~07.16.	1216	SANBA	2012.09.11.~09.18.
8712	DINAH	1987.08.24.~08.31.	1618	CHABA	2016.09.29.~10.06.
9109	CAITLIN	1991.07.24.~07.29.	1825	KONG-REY	2018.10.01.~10.07.
9429	SETH	1994.10.05.~10.14.	1913	LINGLING	2019.09.03.~09.08.
9503	FAYE	1995.07.18.~07.24.	2008	BAVI	2020.08.22.~08.27.
9711	TINA	1997.08.02.~08.09.	2009	MAYSAK	2020.08.28.~09.03.
0014	SAOMAI	2000.09.08.~09.16.	2010	HAISHEN	2020.09.03.~09.07.

Table 2. Basic information of the wind field data.

Items	Period	Region	Resolution	Remark
WRF re-estimated wind field (2019)	1959.~2002.06	20.0°~50.0°N, 117°~147°	Lat. 0.0333°, Long. 0.0333°	1 Hour interval
JMA-MSM	2002.07~2006.02	22.5°~47.5°N, 120°~150°E	Lat. 0.1°, Long. 0.125°	1 Hour interval
	2006.03~Present	22.4°~50.4°N, 120°~150°E	Lat. 0.05°, Long. 0.0625°	

Table 3. Basic information of the Wave observation data.

Observation point	Period	Water depth	Equipment	Location of wave observation point
Gadeoksoodo	2019.03.14.~2021.10.25.	29.0 m	Signature ADCP	
East breakwater	2000.01.22.~2018.07.17.	14.2 m	AWAC	
		13.5 m	DWB	
		14.5 m	WTG	
Yeondo	2013.08.18.~Present	16.1 m	AWAC	

바람장을 이용한 태풍파 재현을 위한 수치모형실험을 수행하기 위해서 “전국 심해설계과 산출 보고서(해양수산부, 2019)”에서 산출된 WRF 재추산 바람장과 JMA-MSM(일본 기상청) 바람장을 사용하였다. 사용한 바람장의 기간, 영역, 공간 해상도와 시간 해상도 등을 Table 2에 요약하여 정리하였다. 한편, 해양수산부에서는 2002년 7월 이후 우리나라 연안에서 태

풍파 재현을 통한 설계파 산정 시 JMA-MSM 바람장의 사용을 권고하고 있으며 선행연구(Kim et al., 2020; Kwon et al., 2020; Yoon et al., 2020)에서도 이와 같은 내용을 뒷받침하고 있다. 2002년 6월 이전에는 JMA-MSM 바람장이 없으므로 “전국 심해설계과 산출 보고서(해양수산부, 2019)”에서 산출된 WRF 재추산 바람장의 사용을 권고하고 있다.

2.2 파랑 관측자료 수집 및 태풍 이벤트 선정

바람장을 이용한 태풍과 추산의 재현성 검증을 수행하기 위해서 부산항 신항 인근 해역에서 관측한 파랑자료를 수집하였다. 파랑 관측자료는 “부산항 신항 해양수리현상 연구개발 용역(부산항건설사무소, 2012, 2017, 2020, 2021)” 등을 통해서 한국해양과학기술원이 부산항 신항 인근 해역에서 관측한 자료를 사용하였다. 관측자료의 기간, 위치, 관측장비에 대한 요약내용을 Table 3에 정리하였다.

파랑 관측자료의 관측기간을 검토한 결과 태풍과 재현성 검증이 가능한 태풍은 2000년 이후 내습한 태풍 SAOMAI(0014), RAMMASUN(0205), RUSA(0215), MAEMI(0314), MEGI(0415), EWINIAR(0603), DIANMU(1004), SANBA(1216), CHABA(1618), KONG-REY(1825), LINGLING(1913), BAVI(2008), MAYSAK(2009), HAISHEN(2010) 등으로 나타났다. 여기서 태풍 내습 시 유의파고 값이 작은 경우는 천해설계와 검토에 있어 큰 의미가 없으므로 제외하고, 최종적으로 고파가 내습한 태풍 RUSA(0215), MAEMI(0314), MEGI(0415), EWINIAR(0603), SANBA(1216), CHABA(1618), KONG-REY(1825), MAYSAK(2009) 등 8개 태풍에 대해서 계산치와 관측치를 비교하여 재현성을 검토하였다.

검토에서 제외되는 태풍 선정 기준은 외해에서 부산항 신항으로 내습하는 경로에 위치한 가덕수도, 신항 동방파제 관측위치에서 부산항 신항의 구조물 설계와 산정에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단한 유의파고 5.0 m 이하, 신항 연도에서 유의파고 3.0 m 이하로 관측된 태풍 이벤트로 하였다.

3. 수치모형 수립

본 연구에서는 바람장을 이용한 태풍과 재현을 위한 수치 모형으로 바람에 의한 파랑의 생성 및 소산을 모의할 수 있는 스펙트럼 모형인 SWAN(SWAN team, 2019)과 항만을 포함하는 연안의 천해역에서 파랑전파에 적용할 수 있는 Boussinesq 방정식을 이용한 Bouss-2D 모형(U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2001)을 사용하였다. SWAN과 Bouss-2D 수치모형의 개요 및 특징을 Table 4에 나타내었다.

TU Delft(Delft Technical University)에서 개발한 불규칙 파 모형인 SWAN(Simulation WAVes Nearshore) 모형은 해상풍에 의한 파랑의 생성, 파랑의 전파, 수심과 흐름에 의한 굴절 현상(refraction), 방파제나 섬 등에 의한 회절 현상(diffraction), 수심과 흐름에 의한 천수 현상(shoaling) 등 파랑 전파과정을 고려할 수 있다. SWAN 모형은 파작용평형 방정식(wave action balance equation)을 지배방정식으로 하는 스펙트럼 모형이며, 사용되는 원천항(source terms)에 따라 제1세대, 제2세대 및 제3세대 모형으로 분류되며 본 연구에서는 제3세대 모형(version 41.31)을 사용하였다(SWAN team, 2019).

바람장을 이용한 설계와 추산실험은 우선 현업에서 일반적으로 많이 사용하는 방법인 태풍 바람장과 SWAN 모형을 이용하여 수행하였으며, 불규칙파의 스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였고 실험조건은 SWAN 모형의 매뉴얼에서 제시하는 Default 값을 적용하였다. 천해역 실험영역은 태풍의 생성부터 발달까지 모의할 수 있게 동아시아 해역을 포함하여 구성하고 격자간격은 $1/40^\circ$ (경도 기준 약 2.5 km) 이하의 해상도로 정밀하게 설정하여 태풍 바람장에 의해 발달하는 파랑추산의 정확도가 최대한 확보될 수 있도록 하였다. 부산항 신항 주변 해역의 상세역 실험영역은 최소격자 간격 $1/2,500^\circ$ (경도 기준 약 40 m)의 등지격자를 설정하여 가능한 상세하게 과업대상지의 태풍 내습 시 설계파를 추산하였다.

Bouss-2D 모형은 미공병단(US Army Corps of Engineers)에서 개발하였으며, 항만을 포함하는 연안의 천해역에서 파랑전파에 적용할 수 있는 Boussinesq형 방정식은 Peregrine(1967)에 의하여 유도되었다. 이 방정식은 수심에 대한 제약이 엄격하여 수심이 파장의 $1/5$ 을 초과하지 않는 경우(즉, 장파에 해당하며 Ursell 수가 상당히 큰 경우에 해당)에 적용이 가능하다. Nwogu(1993)는 수심평균된 유속 대신에 정수면으로부터 아래 임의 지점의 유속을 사용하여 보다 깊은 수심에서도 적용할 수 있는 약비선형 Boussinesq형 방정식을 제안하였다. 또한, Nwogu(1996)는 쇄파를 모의하기 위하여 난류모형을 도입하여 Boussinesq 모형의 적용성을 제고하였으며, 저면마찰과 다공구조물(porous structure)을 감안하기 위한 항도 추가하였다. 본 연구에서 사용한 Bouss-2D 모형은 불규칙파

Table 4. Overview of the SWAN and Bouss-2D numerical model.

Item	SWAN	Bouss-2D
Equation	Wave action balance	Boussinesq
Development	Delft Technical University	US Army Corps of Engineers
Spectrum	JONSWAP	JONSWAP
Simulation Conditions	Apply default values	Apply default values
Model Characteristics	<ul style="list-style-type: none"> - After finding the change in energy with the energy balance equation, calculate the wave height, wave direction, wave period, etc. - Calculate the generation of waves by the wind 	<ul style="list-style-type: none"> - Simultaneous calculation of wave and current using time-dependent wave equation. - The generation of waves by the wind cannot be calculated.

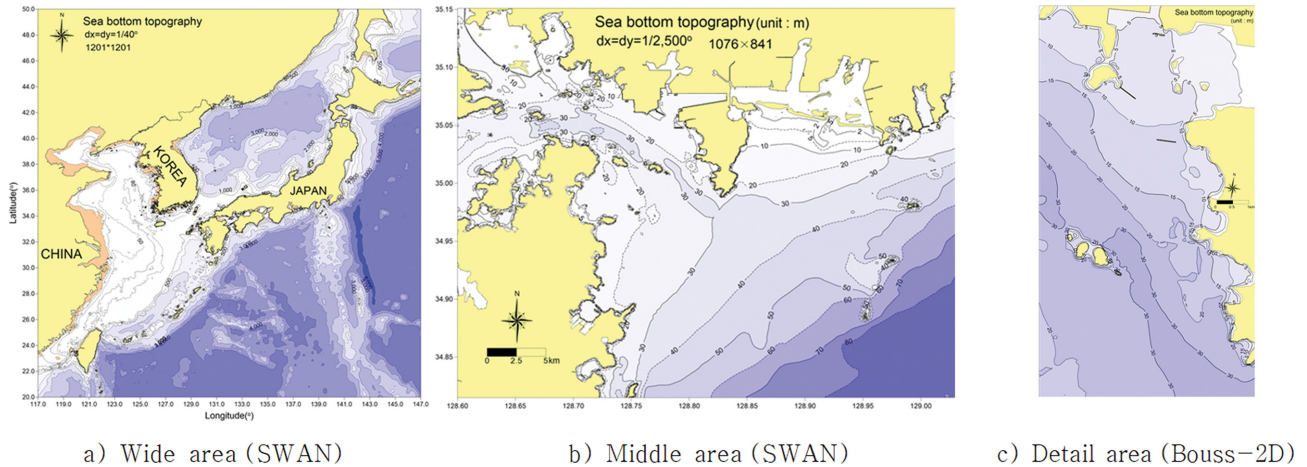


Fig. 2. Computational domain for numerical simulation.

랑의 천수변형, 굴절변형, 회절변형, 반사 및 투과, 저면마찰, 비선형상호작용, 쇄파(난류에너지 모형), 다공매질(porous media)을 통한 파랑전파, 처오름 등을 고려할 수 있다.

부산항 신항의 설계과 추산의 개선방안을 검토하기 위해서 필요한 태풍 MAEMI(0314), CHABA(1618) 내습 시의 상세역 실험은 Bouss-2D 모델을 사용하여 수행하였다. 불규칙파의 스펙트럼은 SWAN 모델과 동일하게 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였고 대부분의 실험조건은 Bouss-2D 모델의 매뉴얼에서 추천하는 Default 값을 적용하였다. 상세역 실험영역은 태풍 내습 시 파랑추산이 정확하게 계산될 수 있도록 태풍파의 주기와 Bouss-2D 모델의 재현성을 검토하여 격자간격 10 m로 정밀하게 구성하였다(Fig. 2 참조).

4. 파랑추산 실험결과

4.1 태풍 시 바람장과 SWAN 모형을 이용한 파랑추산

본 연구에서는 설계과 추산의 중요한 요소인 최대 유의파고의 오차율의 적정 기준을 10%로 정하고 오차율이 10% 이하인 경우는 재현성이 양호한 태풍, 10%를 초과하면 재현성

이 불량한 이벤트로 구분하였으며, 태풍 중심의 위치, 이동경로 등을 분석하여 재현성 불량 원인을 검토하였다.

부산항 신항 인근 해역에 영향을 미친 태풍 내습 시 바람장과 SWAN 모형을 이용한 태풍과 재현 수치모형 실험결과를 파랑 관측자료와 비교하여 검토한 결과 관측치와 계산치의 유의파고, 첨두주기 시계열 경향은 전체적으로 유사하게 나타나지만, 최대 유의파고의 오차율이 관측치 대비 10%를 초과하는 경우가 다수 발생하였다(Fig. 3, Table 5 참조).

태풍 바람장을 이용한 수치모형 실험결과와 파랑 관측자료를 비교·검토한 결과 태풍 KONG-REY(1825), MAYSAK(2009)의 경우 관측치와 계산치의 유의파고, 첨두주기 변화의 시계열 경향이 유사하고 최대 유의파고의 오차율도 10% 이내로 나타나 재현성이 양호한 것으로 검토되었다. 태풍과 추산의 재현성이 양호한 태풍 이벤트의 이동경로를 살펴보면, 동중국해로부터 한반도 서쪽으로 진입하여 서해를 통과하는 경우와 부산항 신항과 인접해서 서쪽으로 통과하는 것으로 나타났다. 반면에 태풍 RUSA(0215), MAEMI(0314), MEGI(0415), EWINIAR(0603), SANBA(1216), CHABA(1618) 내습 시 파랑 관측자료와 계산치 검증을 수행한 결과 유의파

Table 5. Verification results of wave hindcasting during typhoon attack.

Typhoon	Observation point (KIOST)	Max. significant wave height (m)		Difference (m) (C = B - A)	Error (%) (C/A)
		Measured (A)	Computed (B)		
RUSA (0215)	East breakwater	5.59	4.05	1.54	27.5
MAEMI (0314)	East breakwater	8.00	5.18	2.82	35.3
MEGI (0415)	East breakwater	5.65	2.82	2.83	50.1
EWINIAR (0603)	East breakwater	5.28	2.81	2.47	46.7
SANBA (1216)	East breakwater	7.00	4.18	2.82	40.3
CHABA (1618)	East breakwater	5.91	2.75	3.16	53.4
	Yeondo	4.66	2.23	2.43	52.2
KONG-REY (1825)	Yeondo	3.63	3.27	0.36	10.0
MAYSAK (2009)	Gadeoksoodo	7.59	8.32	-0.73	9.60
	Yeondo	3.21	3.26	-0.05	1.60

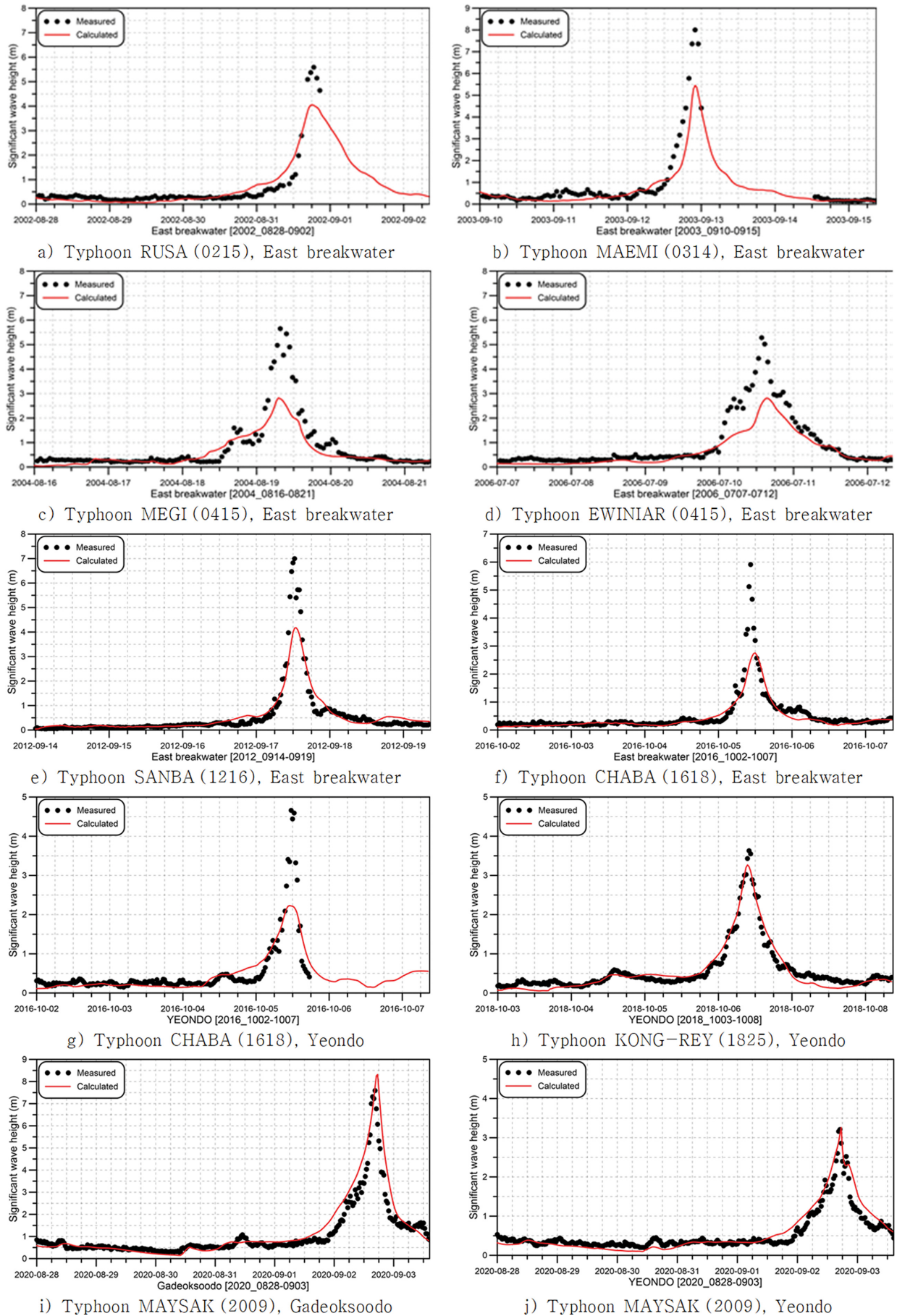


Fig. 3. Verification results of wave hindcasting during typhoon attack.

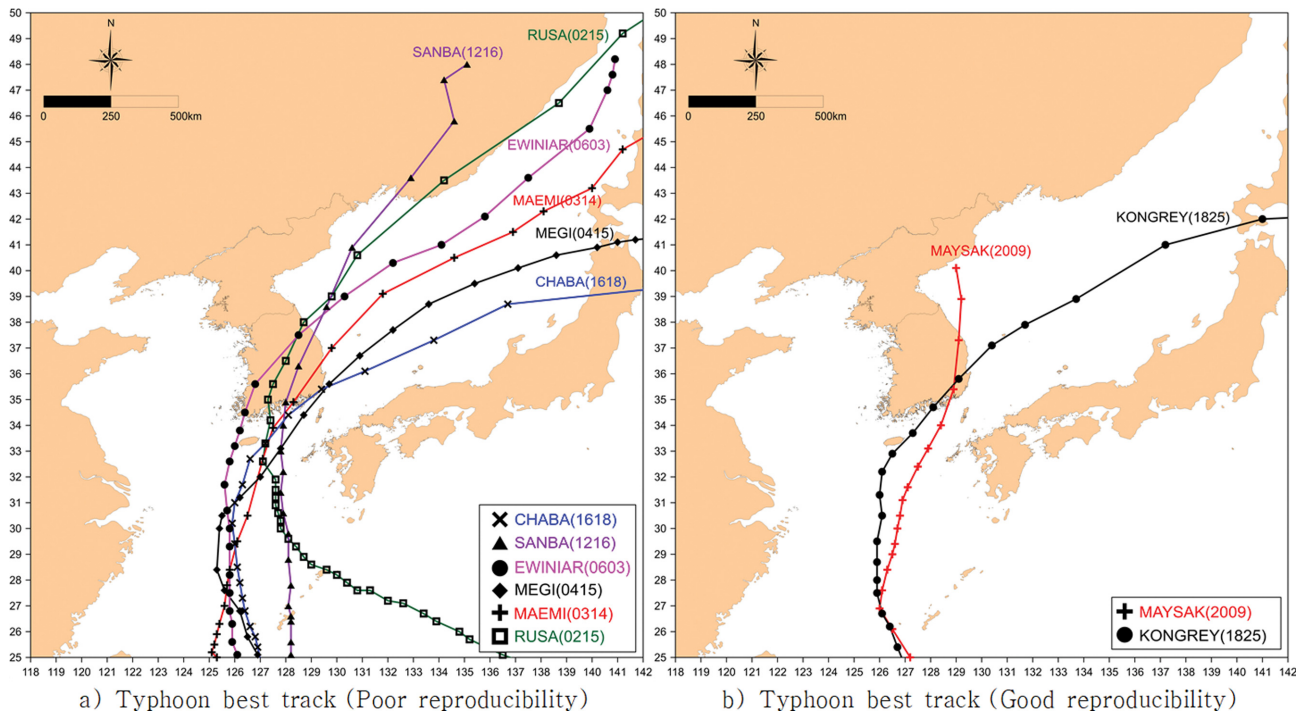


Fig. 4. Typhoon best track.

고, 주기 시계열 경향은 유사하게 나타나지만, 최대 유의파고의 오차율이 10%를 초과하는 것으로 나타나 재현성이 불량한 것으로 검토되었다. 태풍과 추산의 재현성이 불량한 태풍 이벤트의 이동경로를 살펴보면, 한반도 내륙을 통과하거나 부산항 신항 동측을 통과한 것으로 나타났다(Fig. 4 참조). 이는 태풍이 한반도 내륙에 상륙할 때 세력이 급격히 약해지며, 이런 급격한 변화에 대한 파랑추산의 재현성이 떨어지는 것과 태풍 중심이 부산항 신항 동측을 통과할 경우 시계 반대 방향으로 바람이 부는 태풍의 특성상 역방향으로 불어오는 바람에 의한 파랑추산의 재현성이 저조하기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.

한편, 바람장을 이용한 파랑추산에 사용한 SWAN 모형의 경우 파동방정식이 아닌 파작용평형 방정식(wave action

balance equation)을 지배방정식으로 사용하기 때문에 에너지 평형 방정식으로 에너지의 변화를 구한 후 파고, 주기, 파향 등을 계산하므로 복잡한 지형 및 수심으로 이루어진 부산항 신항의 천해설계파를 추산하는데는 다소 한계가 있는 것으로 사료된다.

4.2 바람장 보정과 SWAN 모형을 이용한 태풍파 재현성 개선 실험

태풍파 재현성 개선 방안 검토를 위해 재현성이 불량한 태풍 중 부산지역의 항만에 큰 피해를 유발한 2003년 태풍 MAEMI(0314)와 2016년 태풍 CHABA(1618)의 이동경로에 있는 파랑 관측자료를 이용하여 바람장을 보정한 후 태풍파를 재추산하고 이를 이용한 수치모형 실험결과를 검토하였다.

Table 6. Verification results of wave hindcasting during typhoon attack.

Typhoon	Observation point	Max. significant wave height (m)			Difference (m) (C = B(B') - A)		Error (%) (C/A)	
		Measured (A)	Computed		Before	After	Before	After
			Before correction (B)	After correction (B')				
CHABA (1618)	Seogwipo (KMA)	11.7	10.7	11.8	-1.0	0.1	-8.5	0.9
	South-sea-east (KHOA)	11.2	10.1	12.1	-1.1	0.9	-9.8	8.0
	Geojedo (KMA)	11.5	8.8	10.6	-2.7	-0.9	-23.5	-7.8
	Ulsan (KMA)	7.4	8.0	8.2	0.6	0.8	8.1	10.8
	Yeondo (KIOST)	4.7	2.2	2.6	-2.5	-2.1	-53.2	-44.7
	East breakwater (KIOST)	5.9	2.8	3.3	-3.1	-2.6	-52.5	-44.1
MAEMI (0314)	Ulsan (KIOST)	9.4	9.2	10.2	-0.2	0.8	-2.1	8.4
	East breakwater (KIOST)	8.0	5.2	5.3	-2.8	-2.7	-35.0	-33.8

먼저 수치모형 실험결과와 관측결과와의 비교가 용이한 태풍 CHABA(1618)의 경우에는 이동경로에 기상청과 국립해양조사원에서 관측 중인 서귀포(기상청), 남해동부(국립해양조사원), 거제도(기상청), 울산(기상청) 부이 등이 있는 것으로 조사되었다. 태풍 CHABA(1618) 내습 시의 수치모형 계산치와 관측치의 유의파고 최대값을 비교한 결과 서귀포, 남해동부, 거제도 부이에서는 계산치가 관측치에 비해서 8.5~23.5% 정도 작게 추산되었고, 울산 부이에서는 8.1% 정도 크게 추산되었다(Table 6 참조).

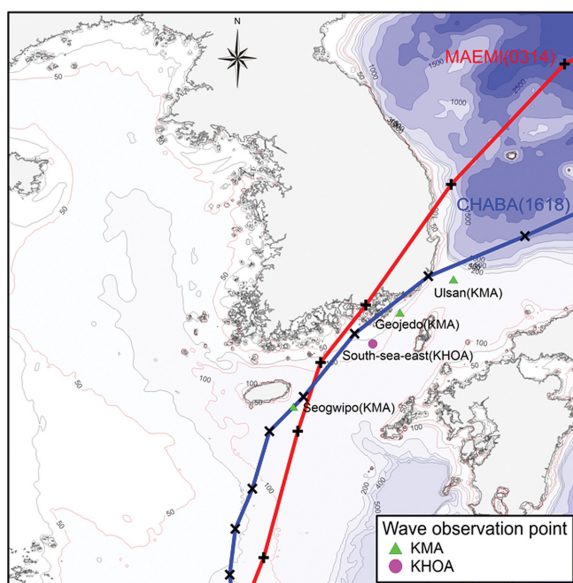
본 연구에서는 태풍 CHABA(1618) 내습 시 파랑 추산치가 관측치보다 전체적으로 작게 산정되어 오차를 개선하기 위해 과소 계산된 파랑 추산치를 높일 수 있는 방안을 검토하였다. 이에 태풍 CHABA(1618) 내습 시의 JMA-MSM 바람장을 서귀포, 남해동부, 거제도 위치에서의 계산치와 관측치의 유의파고 차이와 비례해서 시간에 따라 선형으로 보정한 후 보정된 바람장과 SWAN 모형을 이용하여 태풍파를 재추산하였다. 또한, 부산항 신항 인근해역에 가장 크게 영향을 미친 태풍 MAEMI(0314) 내습 시에도 태풍 CHABA(1618) 내습 시의 계산치와 관측치의 유의파고 차이를 적용하여 JMA-MSM 바람장을 보정한 후 SWAN 모델을 이용하여 태풍파를 추산하고 관측치와의 검증을 통해 재현성을 검토하였다(Fig. 5 참조).

태풍 CHABA(1618) 내습 시 보정된 바람장을 이용한 태풍파 재현성 검토결과, 외해에 위치하는 서귀포, 남해동부, 거제도, 울산에서는 유의파고 최대값을 기준으로 관측치와 양호한 일치도를 보이거나 부산항 신항 전면해역에 위치하는 연도, 신항 동방파제 위치에서는 바람장 보정전과 유사하게 계산치가 관측치에 비해서 약 40% 이상 작게 추산되었다. 또

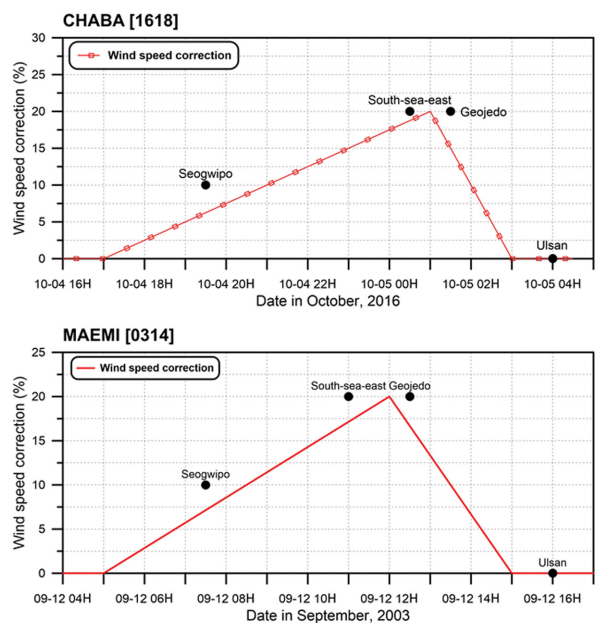
한 같은 방법으로 태풍 MAEMI(0314) 내습 시 보정된 바람장을 이용한 태풍파 재현 결과도 태풍 CHABA(1618) 내습 시와 유사하게 연구대상지 전면해역에 위치하는 신항 동방파제 관측정점에서 바람장 보정전과 유사하게 최대유의파고가 관측치에 비해서 작게 나타나는 등 바람장 보정에 의한 태풍파 재현성 개선은 부산항 신항 인근 연안에서는 효과가 없는 것으로 검토되었다(Table 6 참조).

4.3 Boussinesq 방정식 모형을 이용한 태풍파 재현성 개선 실험

8개의 태풍시 바람장을 이용한 수치모형 실험결과 태풍 KONG-REY(1825)와 MAYSACK(2009)을 제외한 나머지 태풍의 재현성은 유의파고 최대값을 기준으로 오차율이 10%를 초과하는 것으로 나타났으며, 대부분 수치실험에 의한 파고가 관측치보다 작게 나타났다. 이러한 태풍파 재현성을 개선하기 위해 바람장의 강도를 보정하여 태풍파를 추산한 결과 외해에서는 파고의 재현성이 개선되었으나, 부산항 신항 동방파제 전면과 연도 남측의 관측위치에서는 여전히 파고가 작게 계산되었으며, 파고가 작게 계산되는 경우에 가덕도 남측의 외해에서 내습하던 고파가 대부분 가덕수로를 통과하면서 파고가 작아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 SWAN 등 스펙트럼 모형에 비해 천해에서 파랑변형의 재현성이 더 좋은 것으로 알려져 있는 Boussinesq 방정식 모델인 Bouss-2D 모형을 사용하였다. 태풍 MAEMI(0314)와 CHABA(1618) 내습 시 바람장과 SWAN 모델을 이용한 중간역 태풍파 추산결과를 사용하여 Fig. 2에 나타난 상세역 입사경계에서의 입사파 조건을 추출하고, Bouss-2D 모형을 사용하여 파랑변형실험을 수행하였다.



(a) Location of wave observation point



(b) correction of typhoon wind field

Fig. 5. Location of wave observation point and correction of typhoon wind field.

파랑 관측자료와 Bouss-2D 모델의 계산치 검증은 관측정점(Observation point)의 유의파고와 관측구역(Observation area)의 유의파고 평균값을 각각 비교하였다. 즉, phase resolving wave 모델의 특성상 인접 격자의 파고 값 차이가

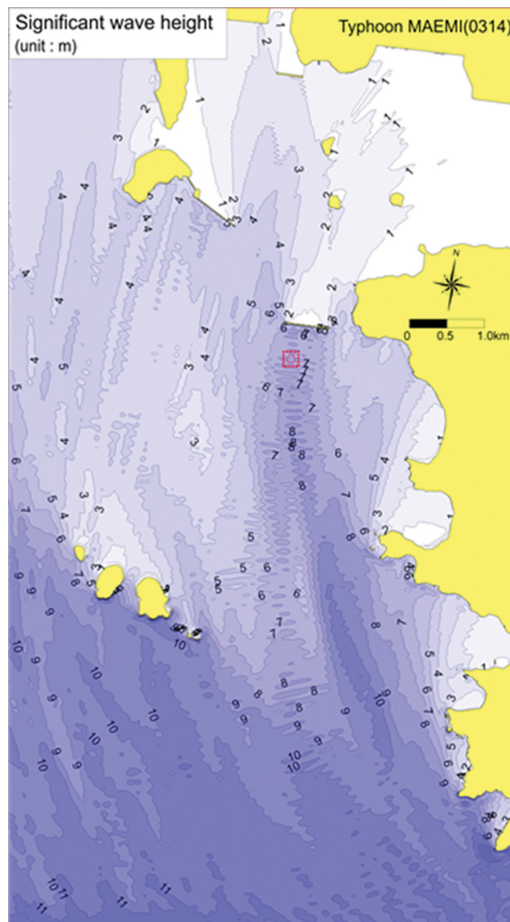
크게 날 수 있는 점을 감안하여 Bouss-2D 모델 실험결과를 관측정점 위치에 해당하는 계산결과를 추출한 경우와 관측정점을 기준으로 반파장 거리 범위 영역의 유의파고 계산결과들을 평균한 관측구역 파고로 구분하여 관측치와 비교, 분석

Table 7. Verification results of Typhoon MAEMI (0314).

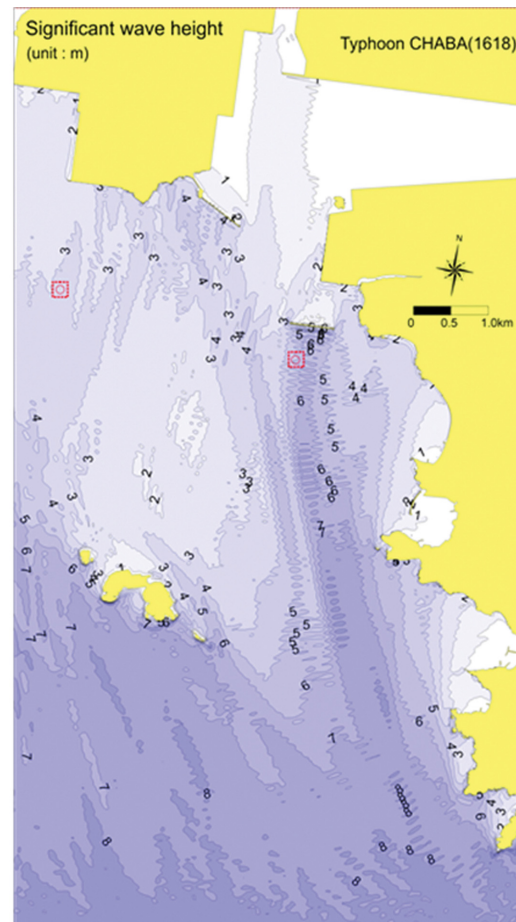
Items		Max. significant wave height (m)				Difference (m)			Error (%)		
		Measured (A)	Computed			(C = B(B') – A)			(C/A)		
			SWAN (B)	B-2D(B')		SWAN	B-2D		SWAN	B-2D	
				Point	Area		Point	Area		Point	Area
East breakwater	Before correction	8.0	5.2	7.6	6.9	-2.8	-0.4	-1.1	-35.0	-5.0	13.8
	After correction		5.3	8.0	7.2	-2.7	0.0	-0.8	-33.8	0.0	-10.0

Table 8. Verification results of Typhoon CHABA (1618).

Items		Max. significant wave height (m)				Difference (m)			Error (%)		
		Measured (A)	Computed			(C = B(B') – A)			(C/A)		
			SWAN (B)	B-2D(B')		SWAN	B-2D		SWAN	B-2D	
				Point	Area		Point	Area		Point	Area
After correction	Yeondo	4.7	2.6	3.1	3.1	–2.1	–1.6	–1.6	–44.7	–34.0	–34.0
	East breakwater	5.9	3.3	4.9	4.3	–2.6	–1.0	–1.6	–44.1	–16.9	–27.1



a) Typhoon MAEMI (0314)



b) Typhoon CHABA (1618)

Fig. 6. Wave hindcasting results using the Bouss-2D model.

하였다.

태풍 MAEMI(0314) 내습 시 바람장 보정 전의 실험조건에서 관측치와 Bouss-2D 모델을 이용한 계산치의 유의파고 비교결과 관측정점 파고의 경우 5.0%, 관측구역 파고의 경우 13.8% 작게 나타났으며, 바람장 보정 후는 관측정점 파고는 관측치와 동일하고 관측구역 파고의 경우 관측치에 비해서 10.0% 작게 산출되었다(Table 7 참조).

태풍 MAEMI(0314) 내습 시 파랑 관측자료를 이용하여 상세역 수심도와 Bouss-2D 모델을 이용한 파랑 추산결과의 재현성을 검토한 결과 동방파제 파랑 관측 위치에서 SWAN 모델을 사용한 파랑 추산치 보다 관측치와 유사한 유의파고가 산출되어 파랑추산의 재현성이 SWAN 모델에 비해서 양호한 것으로 검토되었다.

태풍 CHABA(1618) 내습 시는 바람장 보정 후의 자료가 보정 전에 비해 외해 파랑 관측 위치에서의 재현성에서 양호한 결과를 나타내는 것으로 나타나서, 바람장 보정 전의 자료는 제외하고, 보정 후의 바람장과 SWAN 모델의 중간역 태풍파 추산결과를 사용하여 Bouss-2D 모델을 사용한 상세역 입사경계에서의 유의파고, 침두주기, 파향을 추출한 후 이를 입사파 조건으로 입력하여 파랑변형실험을 수행하였다.

태풍 CHABA(1618) 내습 시 Bouss-2D 모델을 사용한 파랑추산의 재현성 검토 결과, 신항 연도와 동방파제 위치에서 SWAN 모델을 사용한 파랑 추산치 보다는 관측치와 양호한 일치도를 보이거나, 관측 정점의 파고를 비교한 경우 관측치에 비해서 신항 연도에서 34.0%, 동방파제에서 16.9% 작게 추산되었으며, 관측구역의 파고를 비교한 결과 신항 연도는 34.0%로 동일하지만 동방파제 위치에서는 27.1% 더 작아지는 것으로 검토되었다(Table 8 참조). 태풍 CHABA(1618) 내습 시 Bouss-2D 모델을 사용한 경우에는 태풍 MAEMI(0314) 때 보다는 태풍파 재현성의 개선 정도가 떨어지지만, 바람장 자료와 SWAN 모델만을 사용하는 방법보다는 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

태풍 MAEMI(0314)와 CHABA(1618) 내습 시의 파랑추산 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 부산항 신항을 대상으로 “전국 심해설계파 산출 보고서(해양수산부, 2019)”와 “항만 및 어항설계기준 및 해설(해양수산부, 2020)”에서 제시하는 태풍 내습 시 바람장을 이용한 설계파 추산방법을 적용하여 설계파를 추산하고 현장 관측치와의 비교, 검증을 통해서 태풍파 추산의 재현성 개선방안을 연구하였다.

부산항 신항에 영향을 미친 태풍에 대해서 바람장과 SWAN 수치모델을 이용하여 태풍파를 추산한 후 파랑 관측자료와 비교한 결과 태풍 KONG-REY(1825), MAYSACK(2009)을 제외하고 대부분의 태풍파 추산의 재현성이 불량한 것으로 나

타났다.

태풍파 추산의 재현성 개선방안을 검토하기 위해 바람장과 SWAN 수치모델을 이용한 태풍파 추산의 검증 실험결과 재현성이 불량한 태풍 중 부산항 신항 등 부산 일원에 악영향을 미친 태풍 CHABA(1618)와 MAEMI(0314)를 대상으로 바람장을 보정한 후 태풍파를 재추산하였다. 관측치와의 검증결과 외해 파랑관측 위치에서는 양호한 일치도를 보이거나 부산항 신항 전면해역에 위치하는 신항 연도, 동방파제 위치에서는 태풍파 추산의 재현성이 바람장 보정전과 비교하여 개선되는 점을 확인할 수 없었다. 이에 Boussinesq 모델을 이용한 태풍파 재현성 개선 방안을 추가로 검토하였다. 바람장 자료와 SWAN 모델 실험결과 그리고 Boussinesq 모델을 연계하는 방법으로 태풍 CHABA(1618)와 MAEMI(0314) 내습 시의 설계파를 추산하였다. 부산항 신항에 가장 크게 영향을 미친 태풍 MAEMI(0314) 내습 시 관측치와 계산치의 유의파고 비교 결과 바람장 보정 전의 경우 관측정점 파고는 5.0% 작게 나타났으며, 바람장 보정 후는 관측치와 동일하게 산출되어 바람장 보정 전과 후 모두 재현성이 양호한 것으로 검토되었다.

부산항 신항은 동측은 가덕도, 남측은 거제도가 위치하고 외해에서 태풍파가 내습하는 경로에는 가덕수로와 대죽도, 중죽도, 저도 등의 도서가 산재해 있어 복잡한 지형 및 수심으로 구성되어 있어 외해에서 내습하는 파랑이 가덕수로를 통과하며 여러 파고 변화가 발생할 수 있다. 이러한 지형을 대상으로 천해설계파 산출 시에는 바람장 자료와 SWAN 모델만을 사용하는 일반적인 방법보다 본 연구에서 도출한 바람장 자료와 SWAN 모델 실험결과 그리고 Boussinesq 모델을 연계해서 수행하는 방법이 적절할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 “(PG52070)부산항 신항 해양수리현상 연구개발용역(4단계)(4차)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Busan Port Construction Office (2012, 2017, 2020, 2021). The Research and Development on Coastal Hydraulic Investigation of Busan New Port (in Korean).
- 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 (in Korean).
- Kwon, K.K., Jho, M.H. and Yoon, S.B. (2020). Numerical Simulation of Storm Surge and Wave due to Typhoon Kong-Rey of 2018. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 32(4), 252-261 (in Korean).
- Kim, H.J. and Suh, S.W. (2019). Estimation of frequency of storm

- surge heights on the West and South coasts of Korea using synthesized typhoons. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(5), 241-252 (in Korean).
- Kim, G.H., Ryu, K.H. and Yoon, S.B. (2020). Numerical Simulation of Storm Surge and Wave due to Typhoon Bolaven of 2012. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(4), 273-283 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2019). Report on the estimation of deep water design waves of Korea. 347-368 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2020). Port and Fishing Port Design Standard and Commentary. 54-56 (in Korean).
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 119(6), 618-638.
- Nwogu, O.G. (1996). Numerical prediction of breaking waves and currents with a Boussinesq model. In *Coastal Engineering*, 1996, 4807-4820.
- Suh, S.W. and Kim, H.J. (2012). Typhoon surge simulation on the west coast incorporating asymmetric vortex and wave model on a fine finite element grid. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 166-178 (in Korean).
- SWAN team (2019). SWAN User manual (SWAN Cycle III version 41.31). Delft University of Technology, 12-19.
- U.S. Army Engineer Research and Development Center (2001). BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors (Theoretical Background and User's Manual). U.S. Army Corps of Engineers, 1-36.
- Yoon, S.B., Jeong, W.M., Jho, M.H. and Ryu, K.H. (2020). Analysis of Reliability of Weather Fields for Typhoon Maemi (0314). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 32(5), 351-362 (in Korean).

Received 18 October, 2022

Accepted 1 November, 2022