

포항신항 도제 축조에 따른 정온도 개선 효과분석 Evaluation of Harbour Tranquility Improvement in Pohang New Port by Detached Breakwater

류경호* · 정원무** · 권진성*** · 장연식**** · 백원대***** · 김원중*****
Kyong Ho Ryu*, Weon Mu Jeong**, Jinseong Kwon***, Yeon S. Chang****,
Won-Dae Baek***** and Won Goung Kim*****

요지 : 포항신항이 단계별로 완공된 후 제기되어 온 항내정온도 불량 문제는 항만가동률 저하의 주요 원인으로 제기되어 왔으며 이의 개선을 위해 2018~2020년 포항신항 외항방파제의 외해 측에 도제(Detached breakwater)를 건설하고 있다. 본 연구에서는 도제의 효과를 검증하기 위하여 도제 설치 전후로 취득된 항내외의 파랑 관측자료를 분석하여 항내에서의 파고감소율을 비교한 결과를 제시한다. 먼저 이전 수치모델 연구를 통해 예측된 파고는 항내 4개 지점 중 3개 지점에서 관측값과 비슷하게 나타났으며 나머지 1개 지점에서의 오차는 수치모델이 부두 안쪽에 발생하는 중복파 현상을 잘 재현하지 못했기 때문으로 판단된다. 도제 건설 전후 기간의 관측값을 비교한 결과 도제 설치가 항내정온도 개선에 기여한 것으로 나타났는데, 항내 4개 관측지점 모두에서 포항신항 정온 목표파고인 0.3 m를 초과하는 파고의 출현빈도가 도제 건설 후에 크게 감소하였다. 또한 항내외 파고를 비교한 항내 파고 감소율도 모든 파향에 대해 도제 건설 후에 유의미하게 개선된 것으로 나타났다. 본 연구결과는 적절하게 설치된 연안구조물이 항내정온도 향상에 기여하는 효과를 증명한 것으로 향후 유사한 경우의 문제 해결에 유용하게 적용될 수 있음을 보여준다.

핵심어 : 포항신항, 도제, 항내정온도, 파고 감소율, 파랑관측

Abstract : Since the construction of Pohang New Port, the problems of the low harbor tranquility caused by decreasing port operation rate has been continuously reported. In order to improve the harbor tranquility, a detached breakwater (DB) has been constructed outside the outer breakwater of Pohang New Port in 2018~2020. In this study, the effectiveness of the DB was proved by comparing the reduction rates of wave heights that were observed before and after the construction of the DB. First, the observed data were compared with the numerical model results available from a previous study, and the model data showed reasonable agreement with measured data at 3 out of 4 locations inside the port. The discrepancy in one of the locations was because the model could not accurately calculated the effect of wave interference in the inner corner of the port. The observation data showed excellent results that the number of waves that exceeded 0.3 m, the critical value to reach desired harbor tranquility, was significantly reduced after the construction of the DB. In addition, the reduction rate, the ratio of wave heights between outside and inside of the port, was decreased after the DB construction, which proved that properly designed coastal structures such as DB in this study could be effective in improving the port tranquility. The results of this study can be usefully applied for solving problems in similar cases.

Keywords : Pohang New Port, detached breakwater, harbor tranquility, wave decreasing rate, wave measurements

*한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 무기계약직 기술원(Full-time Research Specialist, 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)

***한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 UST학생연구원(UST student, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

****한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임연구원(Corresponding author: Yeon S. Chang, Principal Research Scientist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea, Tel: +82-51-664-3786, yeonschang@kiost.ac.kr)

*****한국해양과학기술원 해양ICT융합연구센터 책임기술원(Principal Research Specialist, Maritime ICT R&D Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Yeongdo-gu)

*****쌍용건설 포항신항 스웰 개선대책 시설 공사 현장사무소장(General Manager, Overseas Civil Engineering and Construction Dept., Ssangyong Engineering and Construction Co.)

1. 서 론

본 논문은 포항신항 항내정온도 확보를 위해 건설된 도제의 효과를 검증하는 파랑관측 결과 제시를 목표로 작성되었다. 포항신항에서 하역중단시간(Downtime)이 빈번하게 발생하여 항만가동률이 저하되는 항내정온도 문제는 1985년 동항이 완공된 이후 계속해서 제기되어 왔다. 그 원인을 분석하기 위해 실험역 현장관측에 기반한 연구가 수행되었으며, 일례로 포항신항 내외의 파랑 동시관측 자료와 포항종합제철 주식회사의 선석별 하역중단기록에 대한 상호분석을 통해 항만정온도 불량원인으로 항외파고가 큰 단주기파 및 주기 10초 이상의 너울이 제시된 바 있다(Jeong et al., 1997). 또한 2008년 9월부터 2009년 9월까지 측정한 포항신항 인근 기상 및 파랑관측 자료를 분석하여, 하역중단은 너울을 포함한 주기 15초 이하의 단주기파가 항내에 침입하였을 때 주로 발생하는 반면 영일만과 포항신항 내에 발생하는 장주기 부진동은 하역중단과 뚜렷한 연관관계가 없음이 밝혀지기도 했다

(Jeong et al., 2011). 따라서 이런 단주기파의 항내 침입을 효과적으로 차단할 경우 항내정온도 문제가 개선될 수 있을 것으로 제안되었다(Jeong et al., 2011; Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010, 2012).

포항신항에 내습하는 풍파 및 너울 등 단주기파로 인한 항만가동률 불량 문제의 개선 대책을 수립하기 위한 기존의 연구 및 용역결과에서는 포항신항 정온 목표파고(이하 ‘목표파고’)로 0.3 m를 제시한 바 있다(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010). 그리고 위 연구들을 통해 제안된 바와 같이 단주기파의 항내침입을 차단함으로써 이러한 목표치를 달성하기 위한 효과적인 방법 중 하나로 포항신항 외측에 도제(Detached breakwater)를 설치하는 방안이 제시되었으며(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010, 2012; Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., 2016), 이 제안에 따라 포항신항 바깥쪽에 케이슨 15함으로 구성된 700 m 길이의 도제를 건설 중에 있다 (Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., 2019,

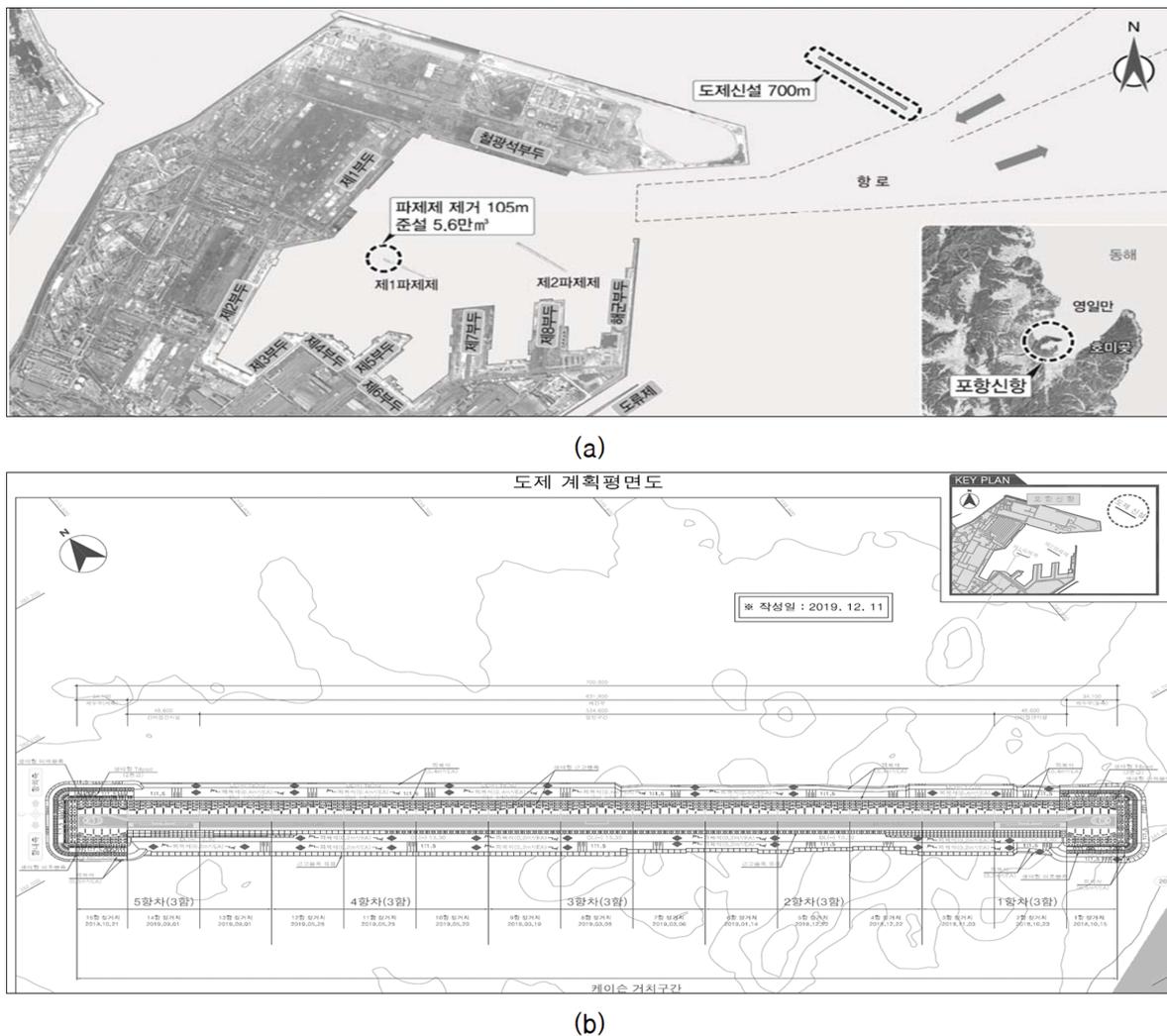


Fig. 1. (a) Map of Pohang New Port with locations of detached breakwater construction outside the port and the two wavebreakers inside the port (Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., 2016), (b) Schematics of detached breakwater (Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., 2019).

2020, Fig. 1 참조). 2018년 10월 13일 케이슨 제 1함 거치 작업을 시작으로 2019년 10월 21일까지 15함의 케이슨 정거치가 마무리되었으며, 2020년 7월말 현재 케이슨 상치공사 진행 중으로 2020년 12월 완공을 목표로 공사가 진행되고 있다. 한편 항내 운항선박의 안전을 위해 항내 정온도 향상을 목적으로 건설된 제 1파제제(first wavebreaker)의 일부도 제거하였다.

일반적으로 도제는 쇄파대 부근의 해안선에 평행하게 축조되어 암영대(Shadow zone)를 제공함으로써 파랑 에너지를 감소시켜 해안선을 보호하는 목적으로 주로 사용된다(Hanson and Kraus, 1991), 본 연구와 같이 항만 외측에 건조되어 항내로 진입하는 파의 에너지를 감소시키는 목적으로도 건설된다(Elchahal et al., 2013).

본 연구는 위에 기술한 선행 연구 결과를 기반으로 건설된 포항신항 도제의 성능을 검증하기 위해 수행되었으며, 도제가 항내정온도 향상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 도제 건설 전후에 항 내외에서 관측한 파랑 자료를 토대로, 동일한 외부 파랑조건 하에서 항내 파고 감소율을 비교한 결과를 제시하였다.

2. 자료 수집 및 분석

2.1 도제 건설

Fig. 1(a)에는 포항신항 및 단주기파의 항내침입 차단을 위

해 신설되는 도제와 부분 제거되는 파제제의 위치를 나타냈다. 그림에서 나타난 바와 같이 도제는 포항신항 외항방파제 전면 해상에 약 700 m의 길이로 외항방파제와 약 35°의 경사를 이루게 건설되었으며 총 15함의 케이슨을 단계별로 정거치하여 진행하였다(Fig. 1(b)). 2018년 10월 15일에 케이슨 제 1함이 정거치 되었으며, 2019년 1월 14일에 제 6함, 3월 19일에 제 9함, 5월 28일에 제 12함, 그리고 10월 21일에 제 15함이 정거치 되었다. 도제의 마루높이는 D.L.(+9.0 m)이며 전면강화 오픈슬릿 케이슨을 사용하였다. 도제 단면은 유지 보수, 내구성, 유지방법 등을 고려하여 기본설계 제원 이상의 경제적이고 효과적인 공법을 선정하여 설계에 반영하였다(Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., 2016).

포항신항 내에 설치된 2개의 파제제 중 제 1파제제는 통항 안정성을 확보하기 위하여 105 m 구간을 제거하였다(Fig. 1(a)). 케이슨 제거작업은 2019년 12월 23일부터 7일간 진행되었으며, 12월 29일에 105 m 구간의 파제제가 모두 제거되었다(Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd., 2019). 다만 본 연구에 사용된 파랑관측 장비는 항의 남동쪽에 위치한 제 7부두와 제 8부두에 설치되어 항내 안쪽에 위치한 제 1파제제의 일부구간 제거는 본 연구 결과에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

2.2 현장관측

Fig. 2에는 Google Earth에서 추출한 영일만 일대와 포항



Fig. 2. Map of Yeongil Bay. Pohang New Port is located in the yellow rectangle and the yellow star marks the location of St. W0. The colored circles in the magnified views of the Pohang New Port mark the wave measurement locations at Sts. W1~W4 with detached breakwater.

Table 1. List of observation stations and data measurements

	Station	Instrument	Locations (Lat., Lon.)	Depth (m)	Measuring frequency (Hz)
Outside of Pohang New Port	W0	AWAC	36°05'21.90"N, 129°28'21.20"E	D.L. (-)21.6	2
	W1		36°00'46.3"N, 129°25'05.60"E	D.L. (-) 8.5	2
Inside Pohang New Port	W2	WTG	36°01'00.1"N, 129°24'58.00"E	D.L. (-)11.0	2
	W3		36°00'42.70"N, 129°24'45.30"E	D.L. (-)10.0	2
	W4		36°00'57.84"N, 129°24'36.96"E	D.L. (-) 9.7	2

Table 2. Summary of observation period and data measurements

	Period
Before construction of detached breakwater	2017.01.01~2019.02.13
After construction of detached breakwater	2019.08.06~2020.05.09

신항의 위치(노란색 사각형 내) 및 본 연구에서 사용한 포항신항 항내외 파랑관측 위치를 나타냈다. 영일만항 외곽시설 우측에 위치한 정점 W0의 관측장비는 노르웨이의 Nortek사에서 개발한 AWAC(Acoustic Wave And Current profiler)이며 착저식으로 2010년 8월에 해저면에 설치되어 2020년 6월까지 영일만 해역에 내습하는 파랑환경의 변화를 관측하였다. 또한 본 연구에서 사용한 포항신항의 항내 관측위치는 4개소로 제 7부두와 제 8부두에 설치되었으며 관측장비는 국내의 AAT사에서 개발한 수압식파고계(WTG: Wave and Tide Gauge)로 부두의 안벽 하단에 설치하였다(St. W1~W4).

도제는 2.1절에서 설명한 바와 같이 2018년 10월 15일부터 2019년 1월 14일까지 제 1~6함이 정거치 되었고, 2019년 8월 6일까지 제 12함이 정거치 되었다. 따라서 본 연구에서는 총 15함 중 제 6함까지 거치된 2019년 2월 13일까지를 도제 설치 전 기간(2017년 1월 1일부터)으로, 그리고 제 12함까지 설치된 2019년 8월 6일 이후를 도제 설치 후 기간(2020년 5월 9일까지)으로 구분하여 관측 자료를 비교하였다. 관측 장비, 관측 위치 및 기간 등에 관한 사항은 Table 1과 2에 정리하였다.

파랑관측은 AWAC 및 WTG 모두 매 30분 간격으로 약 17분간 획득한 자료를 토대로 스펙트럼 분석법을 통해 유의파고(H_{m0})와 침두주기(T_p)를 계산하였고 AWAC의 경우 방향 스펙트럼을 통해 평균파향(Dir_{m0})을 추가로 계산하였다. Nortek사의 AWAC을 사용한 관측자료는 AWAC의 전용해석 프로그램 STORM64를 사용하였으며 스펙트럼 방법 이외에 파별분석법도 추가로 적용되었다. 한편, WTG로 취득된 자료의 경우 정확한 분석을 위해 별도의 관측자료 품질관리를 수행하였다. 항내에서의 파랑 관측자료는 때로 비정상적인 값을 나타낼 때가 있는데 이러한 이상치(outlier)를 제거하기 위

해 Chebyshev smoothing 방법을 적용하여 이상치의 기준을 정하고, 그 기준을 넘어가는 자료는 분석대상에서 제외하였다. 자료 수의 50%를 사용한 Chebyshev 다항식을 적용하여 (관측값)/(다항식 값)이 1.6을 초과할 경우 이상치로 정의하고 분석대상에서 제외하였다.

도제 건설 전후의 파랑 비교는 먼저 해당 기간의 시계열 자료 중에서 항외에서 관측한 AWAC의 유의파고 1 m 이상의 자료를 대상으로 실시하였다. 또한 포항신항에 접근하는 파향을 기준으로 도제에 연직 방향으로 접근하는 NE를 중심으로 NNE 및 ENE 계열 파향으로 구분하였다. 이렇게 분류된 자료를 대상으로 그 중 먼저 고파 이벤트를 선정하여 해당 기간의 시계열 자료를 비교하였고, 항내외 자료의 유의파고 비를 토대로 한 항내 파고 감소율을 계산한 후 그 차이를 도제 건설 전과 후에 비교하여 항내정온도 개선효과를 검토하였다. 또한 항내 4개 관측지점(St. W1~W4)에서의 유의파고를 2.3절에서 설명한 수치모델 선행연구 자료와 비교하여 모델 결과를 검증하였다.

2.3 선행 수치실험

본 장에서는 선행 연구를 통해 포항신항 항내정온도 문제점 분석 및 개선방안 마련을 위해 수행한 수치모형 실험 결과들을 간략하게 정리하여 본 연구가 수행된 배경을 소개하였다. 그리고 Ssangyong Engineering & Construction Co. (2016)의 수치모형 실험 결과 중 도제 건설 전후의 항내정온도를 계산한 결과를 본 연구의 관측 자료와 비교하여 모델을 통한 예측결과를 평가하였다.

먼저 The Ministry of Construction(1987)에서는 Mild-slope equation(Kirby, 1986)을 기반으로 한 천해파 모델을 사용하여 영일만 및 포항신항 주변 파랑장을 계산하였는데, 그 결

과 포항신항 내의 항내정온도 불량의 원인으로 단주기파를 제시하였다. 그에 대한 대책으로 항내에 파제제의 건설을 제안하였으며 이에 따라 1992년 제 7 및 제 8부두 전면에 제 2 파제제가 건설되었다. 또한 동방파제를 연장할 경우 제 8부두와 특수 부두의 정온도가 개선될 수 있다는 연구결과가 나왔으나 이는 선박 운항에 지장을 초래할 가능성이 제기됨에 따라 대체 방안으로 외항방파제의 연장 방안이 제시되었다. 이에 대한 연구가 계속 진행되어 Pohang Iron and Steel Company(1989)에서 실시한 수치모형 실험을 통해 항내정온도 향상을 위해 외항방파제를 직선으로 300 m 연장하는 계획안이 제시된 바 있다. 또한 20 m 격자를 적용한 상세역 모델을 통해 외항방파제 건설 방안들에 대한 수치모형실험을 실시한 결과 외항방파제를 직선으로 200 m 연장하는 방안이 채

택되었으며(Pohang Iron and Steel Company, 1992) 이의 시공은 1996년에 완공되었다.

그 후 SWAN 모형을 사용하여 10 m 격자의 상세역 수치 실험 등을 통해 포항신항 스웰 개선대책으로 항 외측에 도제를 설치하고 항내 제 1파제제 100 m를 제거하는 방안이 제시되었다(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010, 2012). 또한 Ssangyong Engineering & Construction Co.(2016)은 이러한 도제 건설 및 파제제 제거에 따른 영향을 검토하여 최적 설계를 도출하기 위해 수치모형실험을 실시하였는데 이 장에서는 그 중 항내정온도에 대한 실험 결과를 소개하고 본 연구에서 수행된 관측 자료와 비교한다. 사용된 수치모형은 MDWAVE(비정상 환경사불규칙파동방정식 모형, Tac et al., 2015)이며, 모형 격자는 실거리 6.6×7.2

Table 3. Comparison of wave heights calculated by MDWAVE model simulation

	St. W1	St. W2	St. W3	St. W4
Before construction of detached breakwater	0.62 m	0.53 m	0.21 m	0.39 m
After construction of detached breakwater	0.18 m	0.17 m	0.07 m	0.1 m

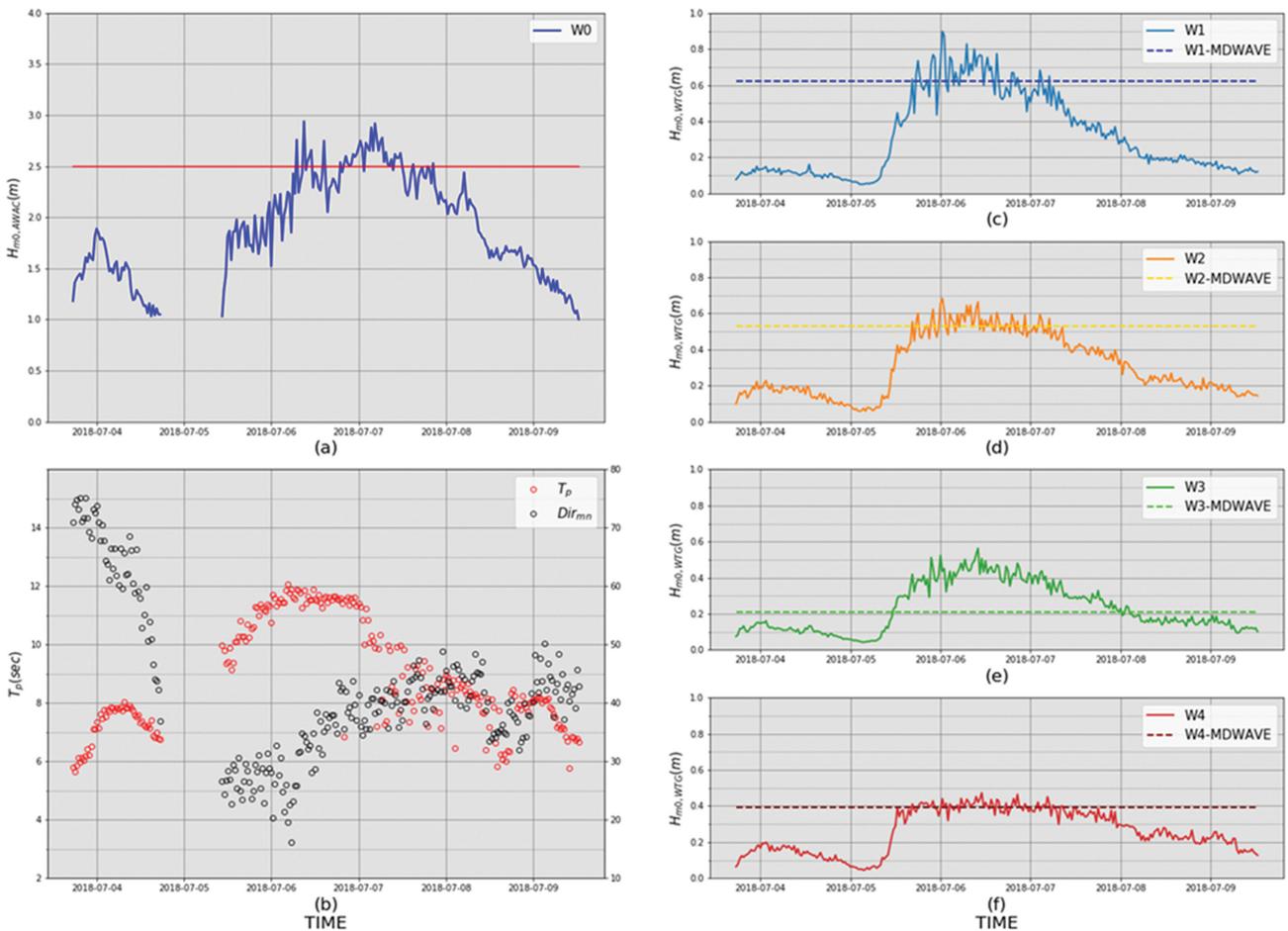


Fig. 3. Comparison of observed wave conditions with numerical model results for a period before the detached breakwater construction (Jul. 4-9, 2018). (a) wave height measured at St. W0 with modeled height (red line), (b) wave period and direction measured at St. W0, (c) wave height measured at St. W1 with modeled height (dashed line), (d) wave height measured at St. W2 with modeled height (dashed line), (e) wave height measured at St. W3 with modeled height (dashed line), (f) wave height measured at St. W4 with modeled height (dashed line).

km 영역에 660 × 720개의 격자를 사용하여 양 방향 모두 10 m 크기의 격자를 사용하였다. 기준해면의 설계조위는 D.L.(+) 1.637 m, 평균해수면은 D.L.(+) 0.123 m를 적용하였다. 수치실험에 적용한 대표파랑으로 유의파고 2.5 m, 침두주기 12.0초 및 파향 NE를 사용하였으며 이는 과거 포항신항 외측의 파랑관측 지점에서 측정한 자료를 검토하여 항내 하역중단을 유발한 너울성 파랑을 선정하였다(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010, 2012). 수치실험은 도제 건설 전과 후로 구분하여 실시하였으며 각각 도제 인근 포항신항 외측의 관측지점에서 대표파랑을 재현하여 동시간대 항내 유의파고를 계산하였다.

Table 3은 Fig. 3에 표시된 네 개의 관측지점에서 도제 건설 전과 후에 계산된 유의파고를 비교하였다. 도제 건설 전, 모든 지점에서 ‘목표파고’ 0.3 m 이상의 유의파고가 계산되었으나 도제 건설 후의 실험결과는 항내 모든 관측지점에서 0.2 m 미만의 유의파고가 계산되어 정온 확보가 가능한 것으로 나타났다. 이 수치모형 결과는 도제를 계획대로 설치할 경우 항내정온도 및 항만가동율이 유의미한 수준으로 향상될 수 있음을 보여주었다.

수치모형실험 결과를 검증하기 위해 본 연구의 관측 자료와 비교하였다. 다만 본 연구에서 사용한 영일만항 우측에 위

치한 관측위치(St. W0)와 수치실험에서 사용한 대표 파랑의 관측위치가 다르기 때문에 정확한 비교는 할 수 없으나 본 논문에서는 2개 지점의 관측값이 유사하다고 가정하고 검토하였다. 본 논문에서 사용한 파랑관측 자료에서는 수치모형 실험에서 사용한 대표 파랑조건과 정확하게 일치하는 기간은 발견되지 않았으며, 따라서 대표 파랑조건과 비슷한 조건을 가진 관측기간을 도제 건설 전과 후에 각각 1 구간씩 선정하여 수치모형실험 결과와 비교하였다.

Fig. 3(a)는 도제 건설 전 기간인 2018년 7월 4~9일까지 정점 W0에서 관측된 파고 시계열 자료이며 붉은색 점선은 수치모형실험 대표 파랑조건인 유의파고 2.5 m를 나타내는 기준선이다. 그림에 나타난 바와 같이 관측된 파고는 2018년 7월 6~7일까지 대표파랑과 비슷한 값을 가지며 같은 기간 침두주기는 11~12초, 그리고 파향은 NNE 계열로서 대표 파랑조건과 비교적 비슷하다(Fig. 3(b)). Fig. 3(c)~(f)는 각각 정점 W1~W4에서 같은 기간 관측된 파고를 보여주며 각 그림의 점선은 수치계산 결과 값을 보여준다. 대표 파랑조건과 비교구간으로 선정된 7월 6~7일까지 정점 W3을 제외한 정점 W1, W2와 W4에서 파고는 수치계산 결과 값과 비슷한 값을 나타내며 특히 정점 W4에서의 파고는 0.4 m로 수치계산 결과 값과 거의 유사하게 나타난다. 그러나 정점 W3의 경우 수

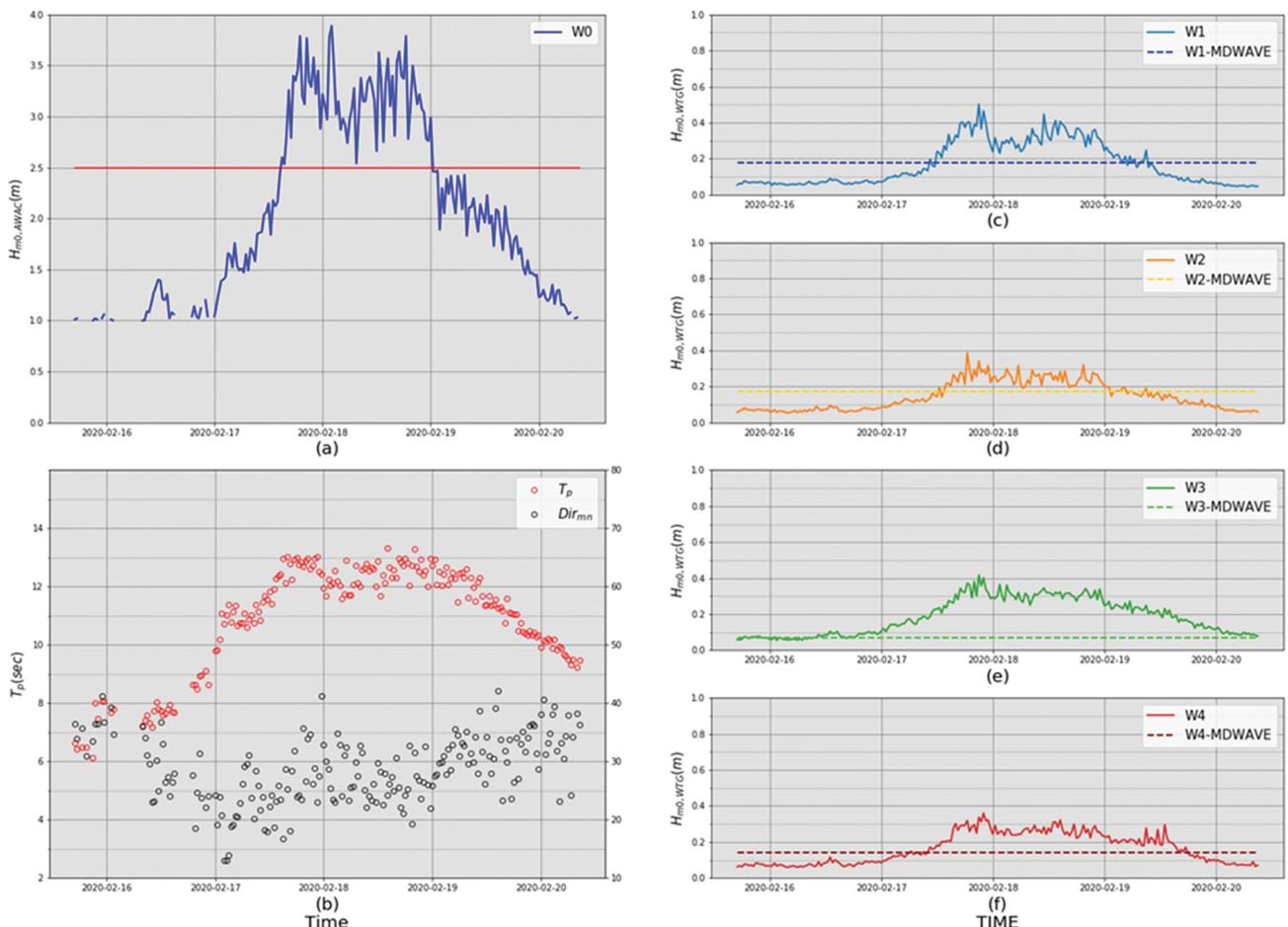


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for a period after the detached breakwater construction (Feb. 16~20, 2020).

치계산 값은 0.2 m를 예측하였으나 관측치는 0.4 m 이상으로 두 배 이상의 차이를 보이며 다른 항내 3개 관측지점에 비해 차이가 크게 나타났다.

Fig. 4(a)는 도제 건설 후 기간인 2020년 2월 16~20일까지 정점 W0에서 관측된 파고 시계열 자료를 보여주며, 붉은색 점선은 Fig. 3(a)에서와 마찬가지로 수치모형실험 대표 파랑 조건의 유의파고 2.5 m를 나타내는 기준선이다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 정점 W0에서 관측된 유의파고는 2020년 2월 17일 오후부터 19일까지 대표 파랑조건의 유의파고 값보다 높으며 같은 기간 침두주기는 약 12초, 그리고 파향은 NE 또는 NNE 계열로서 대표 파랑조건과 비슷하다(Fig. 4(b)). Fig. 4(c)~(f)는 각각 정점 W1~W4에서 같은 기간 관측된 유의파고 값의 변화를 보여주며, 그림에서 나타난 바와 같이 정점 W3을 제외하고 대표 파랑조건 중 유의파고 2.5 m를 지나는 시점(대략 2월 17일 12시 및 2월 19일 00시)에서 대체로 수치모델 결과와 관측치가 부합하는 경향을 보여준다. 그러나 Fig. 3에 제시한 도제 건설 전과 마찬가지로 정점 W0에서 대표파고 2.5 m 시점을 기준으로 정점 W3의 수치계산 값은 약 0.1 m를 예측하였으나 관측치는 0.2 m를 초과하며 두 배 이상의 차이를 나타냈다. 결론적으로 도제 건설 전과 후 모두 항내 관측치가 계산된 수치계산 값과 대체로 일치하였으나, 정점 W3에서는 건설 전후 모두 관측치가 수치계산 결과 값보다 2배 이상 크게 나타났으며 이러한 오차는 수치모형실험 결과가 slit 형태의 부두 안쪽에 위치한 이 지점에서 발생할 수 있는 증복과 현상의 정확한 재현에는 다소 부족했을 가능성 때문으로 판단된다.

3. 관측 결과

3.1 시계열 비교

Fig. 5는 도제 건설 전(case 1; 2017년 10월 18일~10월 25일)에 관측한 항내의 시계열 파랑자료와 파고비를 비교한 것이다. 이 기간은 2017년 제 21호 태풍 LAN이 우리나라 동해안에 영향을 준 시기로 이 기간에 정점 W0에서 관측된 최대 유의파고는 5.98 m($T_p = 11.2$ sec, $Dir_{mn} = N42.5^\circ E$, 2017년 10월 23일 0시 30분)로 나타났다(Fig. 5(a), 5(b)). 특히 이 기간의 자료를 선정한 이유는 입사파향의 변화에 따른 항내 파고비 변화를 보여주기 위한 것으로 10월 22일 태풍의 영향이 시작되기 전에는 평균파향이 주로 ENE 계열이었으나 태풍의 영향권인 23일 이후로는 NE 또는 NNE 계열로 변화했다. 영일만이 열린 방향이 대략적으로 NE 방향인 점을 고려하면 영일만 입구에서의 파향이 NE 또는 NNE 계열로 변할 경우 영일만 내측으로 향하는 파랑의 접근성이 높아지며 이러한 점이 포항신항의 항내정온도에 영향을 미칠 가능성을 분석할 필요가 있다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 태풍의 영향권인 23일 이후 파향이 NE 또는 NNE 계열로 변하면서 정점 W1~W4에서 관측된 유의파고가 태풍 발생 전

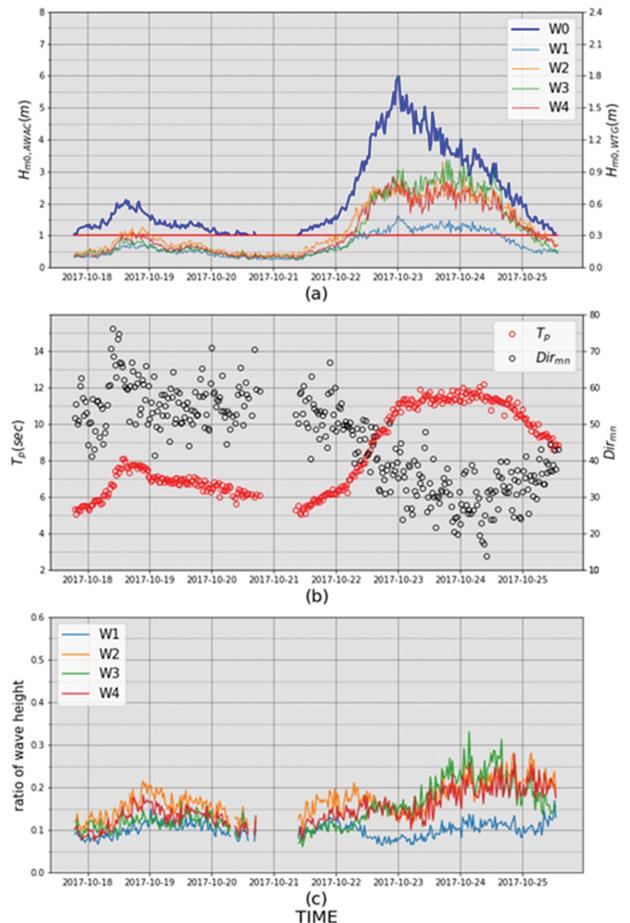


Fig. 5. (a) Time series of observed wave height (H_{m0}) during a period before construction of the detached breakwater (Oct. 10~25, 2017). Left panel (dark blue line): measurements at St. W0. Right panel (green, yellow, light blue and orange lines): measurements at Sts. W1~W4 respectively, (b) time series of wave period (T_p) and direction (Dir_{mn}) measurements, (c) ratio of wave heights (light blue: H_{W1}/H_{W0} , yellow: H_{W2}/H_{W0} , green: H_{W3}/H_{W0} , orange: H_{W4}/H_{W0}).

의 0.3 m 이내에서 태풍의 영향권에 들어 온 10월 23일과 24일에 최대 1.0 m까지 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(c)는 정점 W0과 W01~W04에서 관측된 파고의 비율($R_h = H_{m0,WTC}/H_{m0,AWAC}$)을 보여주는데 태풍 발생 전부터 정점 W0에서 최대 유의파고가 관측된 시기까지 0.1~0.2였던 R_h 가 최대 유의파고가 감소되는 시기인 10월 24일 이후에는 정점 W01을 제외하면 최대 0.3까지 증가하는 것으로 나타났다. 이렇게 항외 파고가 감소하는 기간에 항내 파고비가 증가하는 것은 항내 파고를 증가시키는 요인이 입사파고 외에도 파향이나 주기 같은 추가 요소가 있을 가능성을 말해준다.

Fig. 6은 도제 건설 전의 또 다른 기간(case 2; 2018년 3월 5일~3월 11일)의 항내의 시계열 파랑자료와 파고비 변화를 보여준다. 이 기간은 하계 태풍 외에 동해 상에서 고파가 발생하는 또 다른 주요 원인인 온대성 저기압의 영향으로 폭풍파가 발생한 시기이며, 태풍에 의한 영향과 비교하기 위해

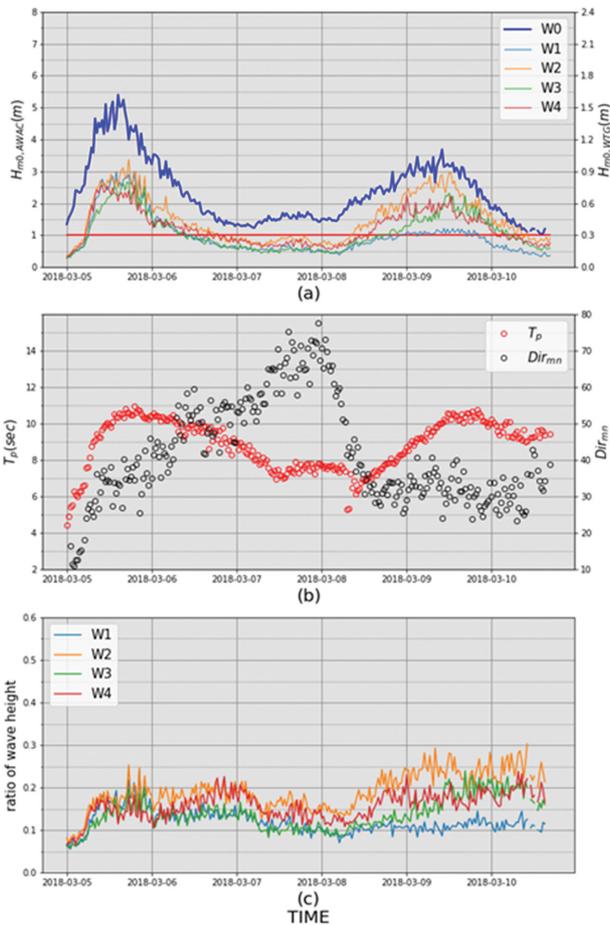


Fig. 6. Same with Fig. 5 but for another period before the detached breakwater construction (Mar. 5~10, 2018).

선정하였다. 약 1주일간의 기간 동안 2회에 걸쳐 고파가 발생하였으며 각각의 최대 유의파고는 5.4 m($T_p = 10.4$ sec, $Dir_{mn} = N33.6^\circ E$, 2018년 3월 5일 14시 30분)와 3.69 m($T_p = 10.0$ sec, $Dir_{mn} = N24.1^\circ E$, 2018년 3월 9일 10시)로 나타났다. 이 시기에는 항외 정점 W0에서 파고가 증가한 시기에 정점 W1~W4에서 관측된 항내파고 역시 증가하였으며 고파랑이 발생하기 전 ‘목표파고’(Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office, 2010)보다 작았던 유의파고가 고파랑 시기에는 1.0 m 이상으로 증가하였다. 특이한 것은 관측기간 중 정점 W0과 W1~W4의 항내 파고비를 비교한 R_h 값이 정점 W0에서 최대 유의파고($H_{m0} = 5.4$ m)를 기록했던 3월 5일에는 0.2 이하로 나타난 반면에 최대 유의파고가 더 작았던 ($H_{m0} = 3.69$ m) 3월 9일에는 최대 0.3으로 오히려 증가하였다. 이것은 Fig. 5에서 분석한 바와 같이 파향 변화에 의한 영향일 수 있을 것으로 판단된다. 즉 3월 5일에서 8일까지 파향이 NE에서 ENE 계열로 점차 변화되다가 3월 9일 경에 급격하게 NNE로 바뀌는데 이렇게 파향이 NNE인 시기는 R_h 가 최대 0.3까지 증가한 시기와 일치하며, 이를 통하여 파향이 도제 건설 전의 항내정온도에 상당한 영향을 끼쳤을 것으로 판단할 수 있다.

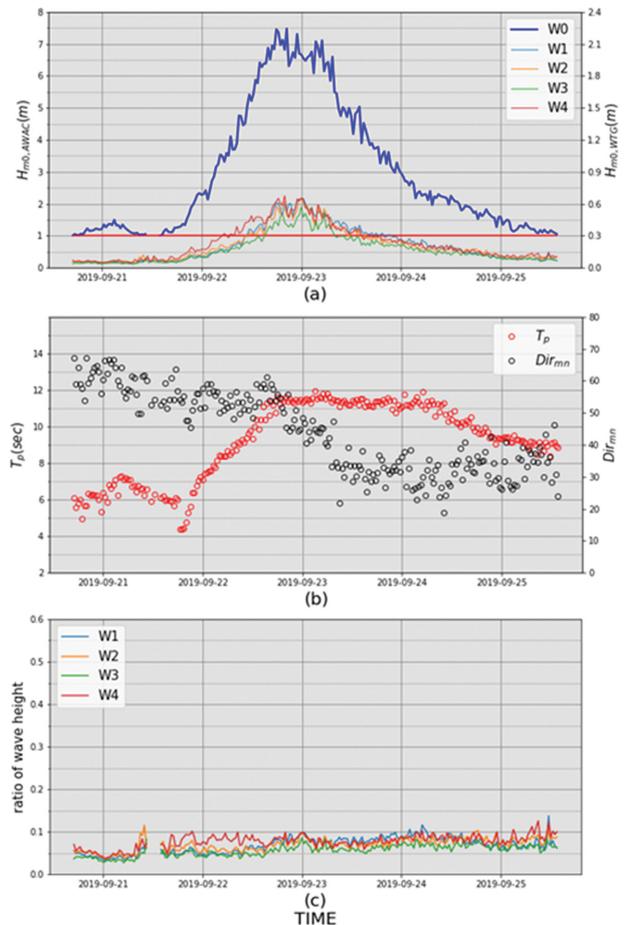


Fig. 7. Same with Fig. 5 but for a period after the detached breakwater construction (Sep. 21~25, 2019).

Fig. 7은 도제가 설치된 후(case 3; 2019년 9월 21일~9월 25일)의 파랑시계열 자료를 비교하였다. Fig. 7은 도제의 케 이슨 제 13함이 거치된 후인 2019년 9월 22일과 23일에 한반도에 피해를 준 2019년 제17호 태풍 ‘TAPAH’가 통과한 기간(2019년 9월 21~25일)의 자료를 보여준다.

관측기간 동안 정점 W0에서 관측된 최대 유의파고는 7.46 m ($T_p = 11.6$ sec, $Dir_{mn} = N55.7^\circ E$, 2019년 9월 22일 18시)로 나타났다. 최대 유의파고를 기록한 이후 파향은 NE에서 NNE로 변하고 침두주기 또한 12초까지 증가한다. 항내 파고는 대부분의 기간에서 ‘목표파고’인 0.3 m 이하이나 정점 W0의 파고가 최대였던 9월 23일에는 ‘목표파고’를 초과하여 약 0.6 m 까지 증가한다. 도제 건설 전 자료인 Fig. 5 및 6에 나타난 항내 최대파고가 약 1 m까지 기록된 것과 비교하였을 때 항외 파랑이 포항신항 내로 진입하였을 때 최대 유의파고 감소율은 도제 건설 후에 크게 경감한 것으로 보인다. 또한 Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 항내외 파고비율인 R_h 는 최대파고 기간에도 0.1 이내로 도제 건설 전에 비해 경감된 수치를 보여준다. 특히 파고, 파향 및 주기의 급격한 변화와 상관없이 전 기간에 걸쳐 0.1 이하의 작은 값을 보여주며 이는 도제 건설 전인 Fig. 5 및 6의 결과와 구분되는 것으로 도제가 파고,

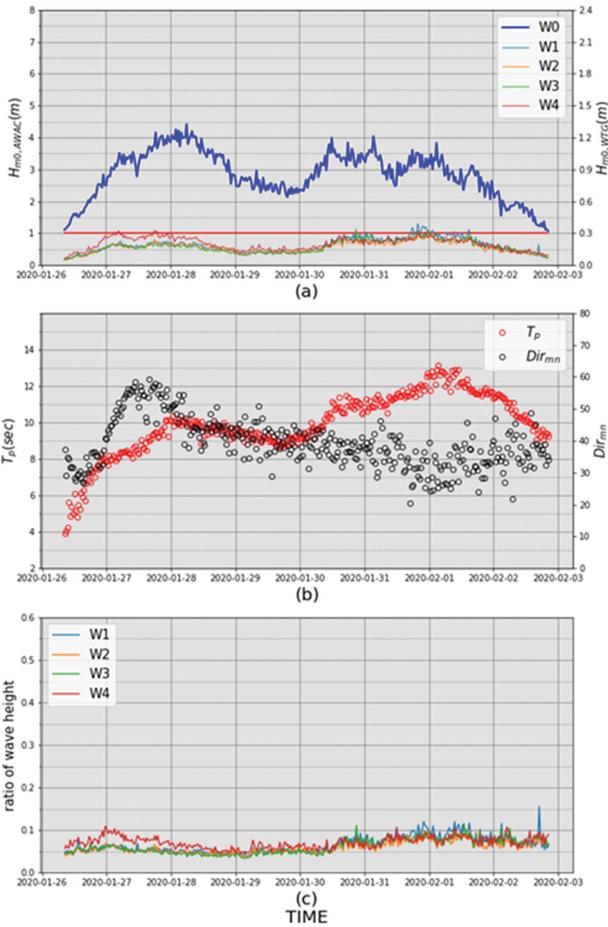


Fig. 8. Same with Fig. 5 but for another period after the detached breakwater construction (Jan. 26~Feb. 3, 2020).

주기 및 파향 변화에 상관없이 항내정온도 향상에 기여하고 있음을 보여준다.

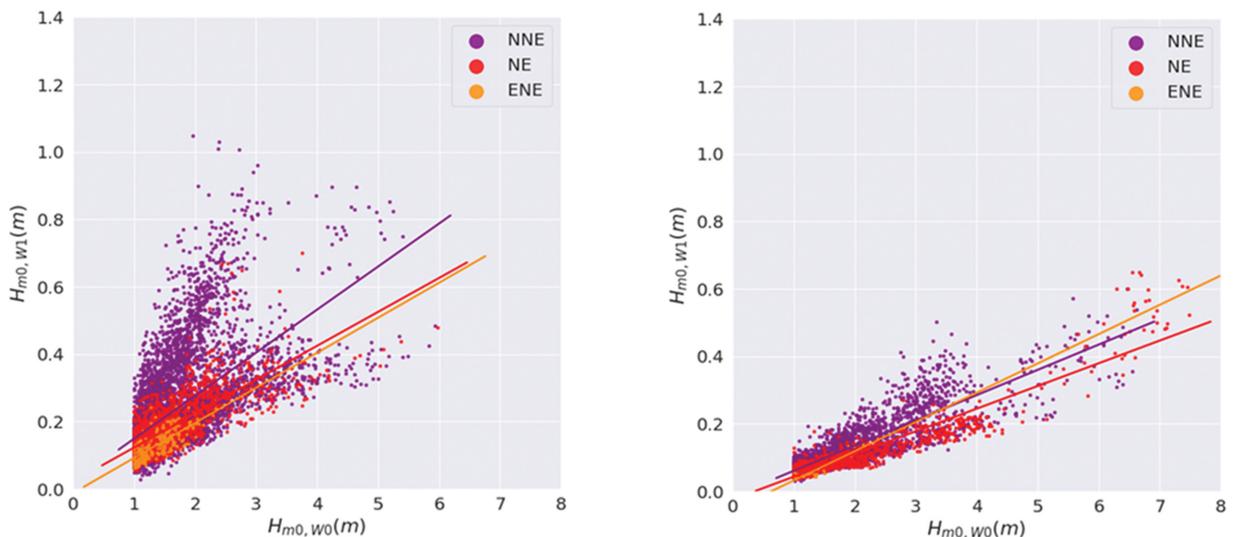


Fig. 9. (a) Wave height distribution measured at St. W0 (x-axis) and W1 (y-axis) before the construction of detached breakwater (Jan. 1, 2017~Feb. 13, 2019) with different incident wave directions (reds: NNE, orange: NE, yellow: ENE). The solid lines are the linear regression results of corresponding colored dots. (b) same with (a) but after the construction of detached breakwater (Aug. 6, 2019~May 6, 2020).

Fig. 8에서는 도제가 설치된 후의 또 다른 경우(case 4; 2020년 1월 26일~2월 3일)의 파랑시계열 자료를 비교하였다. Fig. 8은 도제 케이스 제 15함 설치가 완료된 후인 2020년 1월 26일부터 2월 3일까지의 파랑시계열 자료를 보여준다. 이 기간 역시 Fig. 6과 마찬가지로 하계 태풍이 아닌 온대성 저기압에 의한 폭풍파가 발생하였을 경우로 Fig. 8의 도제가 설치된 후 태풍 내습 시와 비교하기 위해 선정하였다. Fig. 8(a)와 (b)가 보여주듯이 유의파고는 4.42 m($T_p = 10.0$ sec, $Dir_{mn} = N44.8^\circ E$, 2020년 1월 28일 06시)로 최고치를 나타내었으나 그 후에도 고파가 지속되어 2020년 1월 30일 6시부터 2월 1일 16시 30분까지의 기간 중 대부분의 유의파고가 3.0 m를 상회하였다. 파향 및 주기의 변화도 커서 2020년 1월 27일의 NE 계열 파향은 1월 31일 이후 NNE로 변하며 침두주기 역시 1월 27일 8초에서 2월 1일 최대 12초까지 증가한다. 그러나 이러한 파고, 파향 및 주기의 변화와 상관없이 항내 최대 유의파고는 0.4 m 내외로 나타났으며, 항내 파고비 R_h 값은 정점 W1~W4의 4개 지점 모두에서 0.1 이하의 낮은 값을 가지는 것으로 나타나는 등 도제 건설 후에 하계 태풍과 온대성 저기압에 의한 모든 폭풍파 조건에서 도제 건설 전과 비교하여 항내정온도가 향상되었음을 보여준다.

3.2 항내 파고 저감율 검토

항내 파고 저감율을 검토하기 위해 항외 관측 정점 W0에서 관측된 유의파고와 동시에 항내 4개(Sts. W1~W4) 지점에서 관측된 유의파고를 도제 건설 전후의 기간으로 구분하여 비교, 검토하였다. 도제 건설 전 기간은 2.3절과 동일하게 2017년 1월 1일~2019년 2월 13일로 설정하고, 건설 후 기간은 2019년 8월 6일~2020년 5월 9일로 설정하였다. 항내 파고 저감율 계산은 우선 각 기간 별로 정점 W0에서 관측된

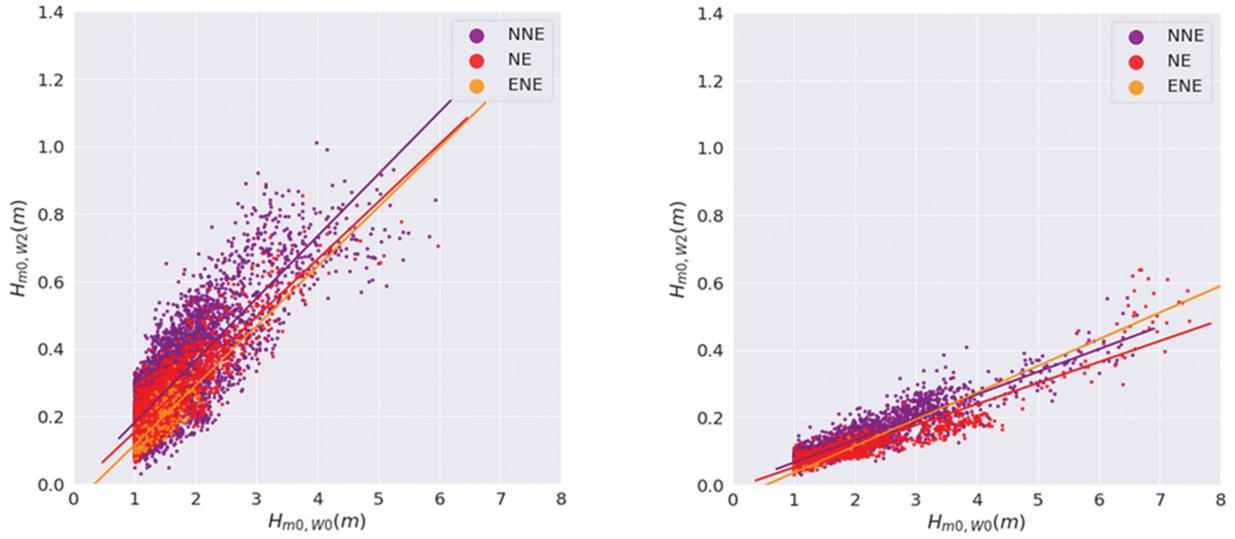


Fig. 10. Same with Fig. 9 but between W0 and W2.

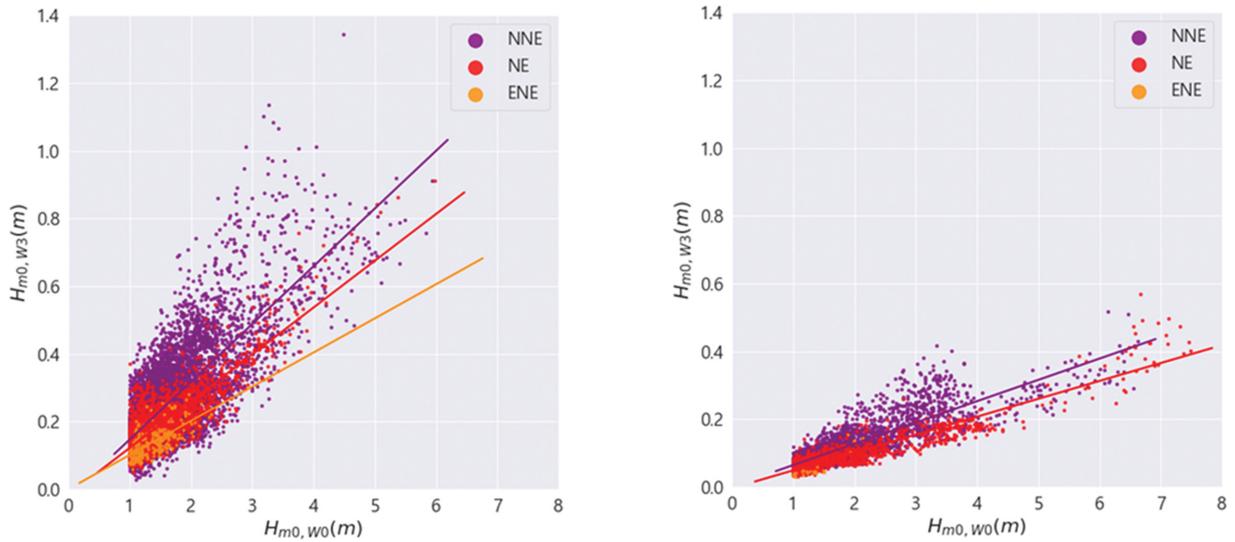


Fig. 11. Same with Fig. 9 but between W0 and W3.

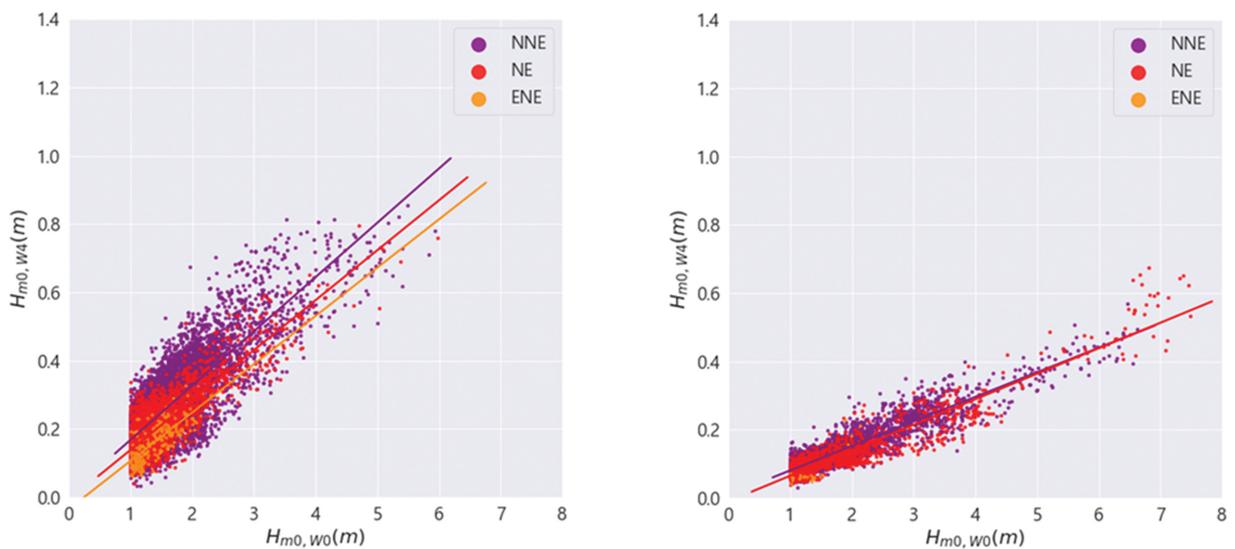


Fig. 12. Same with Fig. 9 but between W0 and W4.

유의파고 1.0 m 이상의 자료와 동시간대 항내 관측자료(Sts. W1~W4)를 대상으로 실시하였다. 이는 항외 입사파고가 1.0 m 이하이면 도제의 유무와 상관없이 포항신항 내의 항내정온도가 확보될 것이라는 예상을 토대로 하였으며 이에 대해서는 4장 결론에서 보다 자세히 논의하였다.

Figs. 9~12는 각각 정점 W1, W2, W3 및 W4에서 관측된 유의파고와 W0에서 관측된 동시간대 유의파고 자료를 도제 건설 전후로 구분하여 비교한 산포도를 보여준다. 산포도가 로측은 정점 W0에서 관측된 유의파고를, 세로측은 항내에서 관측된 유의파고를 나타낸다. 따라서 이 산포도를 토대로 선형 회기분석을 통해 계산한 기울기는 각각의 기간에 항외 입사파(St. W0)가 항내로 진입하며 감소하는 파고의 저감율을 보여준다. 또한 산포도에 표시된 점들은 정점 W0에서 관측된 파향에 따라 각기 다른 색들로 표시되어 저감율과 파향의 관계를 파악할 수 있도록 하였으며 선형 회기분석도 주파향인 NNE, NE, ENE의 3개 파향 별로 구분하여 실시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 관측된 자료의 대부분이 NE나 NNE 계열이며 ENE 계열은 상대적으로 자료의 수가 작게 나타났다.

Figs. 9~12에 나타난 산포도의 회기분석을 통해 도제 건설 전후의 주요 파향별 기울기, 즉 항내파고 저감율을 Table 4에 정리하여 비교하였다. 도제 건설 전후의 산포도 기울기를 비교해 보면 도제의 효과를 분명하게 보여주는데 건설 전에는 0.101~0.189였던 기울기가 도제 건설 후에는 0.053~0.088로 감소하는 것을 알 수 있다(Table 5). 도제 건설 전후에 항내 4개 관측지점(Sts. W1~W4)에서 관측된 유의파고가 '목표 파고'인 0.3 m보다 크게 나타난 빈도를 비교, 검토하여 Table 4에 정리하여 비교하였다. Table 4에 정리한 결과에 따르면 도제 건설 후 항내 파고가 0.3 m를 초과하는 빈도가 크게 감소하여 도제가 항내정온도 개선에 기여했음을 알 수 있다. 파향에 따른 효과도 검증하였는데 도제 건설 전에는 입사파향이 NNE 계열일 때 산포도 기울기가 가장 크고 NE 계열일

때 중간이었으며 ENE 계열일 때 가장 작았다. 이는 앞의 시 계열 그림에서 나온 결과를 뒷받침하는 것으로 도제 건설 전에는 동일 파고조건이라도 파향이 변하면 항내정온도에 영향을 미칠 수 있었음을 보여준다. 그러나 도제 건설 후에는 파향에 따른 항내 침입파고 감소율이 파향에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 어떤 방향에서 파가 접근하더라도 도제에 의해 효과적으로 항내 침입파가 감소한다는 것을 보여준다. 또 다른 특이사항은 도제 건설 후 항외 정점 W0에서 관측된 파고에 대해 동시간대의 항내파고 분포 범위가 줄어들었다는 것이다. 예를 들어 Fig. 9(a)의 도제 건설 전 산포도를 보면 정점 W0에서 관측된 파고가 2.0 m일 때 정점 W1에서 관측된 파고는 0.1~0.6 m로 넓게 분포하였다. 그러나 건설 후에는 정점 W0에서의 파고 2.0 m에 대해 정점 W1에서의 파고 분포 범위가 0.1~0.3 m로 감소했음을 알 수 있다. 이는 도제 건설 전에는 고파가 항내로 진입할 때 저감되는 비율이 불안정하고 변동폭이 컸으나, 건설 후에는 거의 모든 고파가 항내에서 저감되어 안정된 저감율을 보이며 따라서 도제가 항내로 진입하는 고파를 저감시키는 효과가 뛰어난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 포항신항 항내정온도 확보를 위해 포항신항 외항방파제 전면 해상에 건설된 도제의 효과를 파랑관측 자료 분석을 통해 검증하였다. 검증은 영일만 입구에 설치된 초음파식 파향파고계 AWAC을 이용하여 관측한 파랑자료와, 포항신항 내 제 7부두와 제 8부두의 4개 지점에서 수압식 파고계를 사용하여 관측한 파랑자료를 비교함으로써 수행되었다. 도제공사 중 케이슨 설치는 2018년 10월 15일부터 2019년 10월 21일까지 약 1년에 걸쳐 수행되었으며, 이에 따라 도제 설치 전후 구간을 2019년 2월 13일 이전과 2019년 8월 6일

Table 4. Linear regression (slope) of wave height distribution

		Wave direction	W1	W2	W3	W4
Before construction of detached breakwater	NNE		0.127	0.189	0.173	0.159
	NE		0.101	0.164	0.139	0.146
	ENE		0.104	0.161	0.101	0.141
After construction of detached breakwater	NNE		0.075	0.067	0.063	0.072
	NE		0.067	0.062	0.053	0.075
	ENE		0.088	0.079	-	-

Table 5. Comparison of operation rates of Pohang New Port before and after the construction of detached breakwater

	W1		W2		W3		W4	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
# of days when $H_{m0} > 0.3$ m	1,631	194	2,597	117	2,154	116	2,635	173
# of total days	9,684	4,676	7,966	4,670	10,184	4,670	10,578	4,670
operation rate (%)	83.2	95.9	67.4	97.5	78.8	97.5	75.1	96.3

이후로 구분하여 각각의 기간에 대하여 자료 분석을 실시하였다.

분석 결과 도제 설치가 항내정온도 개선에 기여한 것으로 나타났는데, 항내 4개 관측지점에서 관측한 자료 모두 포항신항 정온 목표파고인 0.3 m를 초과하는 파고의 출현빈도가 도제 건설 전에 비해 도제 건설 후에 크게 감소하였다. 항내 외 파고 분포도를 토대로 계산한 항내 파고 감소율도 도제 건설 후에 감소하였으며, 도제 건설 전에는 입사 파향에 의해 변동폭이 컸던 감소율이 건설 후에는 파향에 관계없이 변동폭이 줄어들고 안정적으로 저감되는 것으로 나타났다. 이전 연구에서 수치모델을 통해 계산한 예측치와 비교한 결과 수치모델 값은 포항신항 내 정점 W1, W2와 W4의 3곳의 관측지점에서 측정한 파고값과 비슷한 결과를 나타냈으나 상대적으로 가장 내측 부두에 위치한 정점 W3에서는 관측 값이 수치모델 값의 약 두 배에 달하는 차이를 나타냈다.

본 연구는 적절하게 배치된 도제와 같은 연안구조물이 항내정온도 개선에 기여하는 효과를 증명한 것으로, 향후 수치모델의 고정밀화 등 예측 정확도를 향상시킬 경우 비슷한 경우의 문제 해결에 유용하게 적용될 수 있음을 보여준다. 또한 결과의 정확한 검증을 위해서는 다양한 지점에서 장기 관측을 통한 폭넓은 자료 수집 및 분석이 필요함을 보여준다.

마지막으로 수압식 파고계를 사용해 항내에서 측정한 파랑 자료의 유효성에 관한 논의가 필요하다. 본 연구에 사용된 파랑자료는 항 외부에 설치한 AWAC의 관측값 중 파고가 1 m 이상인 경우만 선별하여 분석을 수행하였다. 이는 1 m 이하의 저파랑 조건 하에서는 도제의 유무에 상관없이 항내정온도가 유지될 수 있을 것이라는 가정을 적용한 것이기도 하지만, 또한 항내 관측에 사용한 수압식 파고계의 경우 위의 저파랑 조건 하에서 파고가 때때로 과소평가되는 경향이 발견되어 이런 자료를 분석에 포함할 경우 통계값의 정확도가 저하될 가능성이 있기 때문이기도 하다. 현재 저파랑 시 수압식 파고계의 관측 정확도에 대한 연구들이 진행 중으로 관련된 연구결과도 보고될 예정에 있으나, 본 연구에서는 주요 목적인 도제 건설 후의 항내정온도 향상을 입증하기 위하여 저파랑 조건의 자료들을 분석에서 배제하였다. 뿐만 아니라 본 연구서 사용된 자료는 동일한 지점에서 동일한 수압식 파고계를 통해 얻어진 자료로서, 도제 건설 후에 파고가 현저히 감소한 결과만 고려하더라도 도제의 유효성이 충분히 검증된 것으로 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 “포항신항 스웰 개선대책 시설 공사 중 파랑모니터링 용역(PI56030)”의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구의 수행을 위한 (주)쌍용건설의 지원에 감사를 드립니다.

References

- Elchahal, G., Younes, R. and Lafon, P. (2013). Optimization of coastal structures: Application on detached breakwaters in ports. *Ocean Eng.*, 63, 35-43.
- Hanson, H. and Kraus, N.C. (2016). Shoreline response to a single transmissive detached breakwater. 22nd Int. Conf. Coast. Eng., <https://doi.org/10.1061/9780872627765.156>.
- Jeong, W.M., Oh, S.B., Chae, J.W. and Kim, S.I. (1997). Analysis of the wave induced downtimes in Pohang New Port. *J. of Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 9, 24-34 (in Korean).
- Jeong, W.M., Ryu, K.H., Back, W.D. and Choi, H.J. (2011). Down-time analysis for Pohang New Port through long-term investigation of waves and winds. *J. of Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 23, 226-235 (in Korean).
- Kirby, J.T. (1986) A general wave equation for waves over rippled beds. *J. of Fluid Mechanics*, 162, 171-186.
- Pohang Iron and Steel Company (1989) Report on Comprehensive Plan for Pohang Port and Design for the Raw Material Wharf, Chapter on Harbor Tranquility Investigation, p.182 (in Korean).
- Pohang Iron and Steel Company (1992) Report on Numerical Model Experiments for the Construction of 4th Disposal Facility of Pohang Steel Works, p.377 (in Korean).
- Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office (2010). Report on Pohang New Port Swell Analysis for Improvement Plan Establishment. http://www.archives.go.kr/next/search/showDetailPopUp.do?rc_code=1310377&rc_rfile_no=201003411695 &rc_ritem_no=000000000001#viewer.
- Pohang Regional Maritime Affairs and Port Office (2012). Report on Pohang New Port Swell Improvement Feasibility Test for Basic Plan (in Korean).
- Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd. (2016). Report on Construction Design for Pohang New Port Swell Improvement (in Korean).
- Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd. (2019). Personal communications (in Korean).
- Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd. (2020). Personal communications (in Korean).
- Tac, D.-H., Kim, G.-Y., Jeon, K.-A. and Lee, D.-I. (2015). Improvement of the estimation method for harbor tranquility of fishery harbor. *J. of Korean Soc. Mar. Env. & Safety*, 21, 637-644 (in Korean).
- The Ministry of Construction (1987) Report on Wave Observation and Numerical Model Experiment in Pohang New Port. Chapter 2, Wave Observation and Numerical Model Experiment, p.440 (in Korean).

Received 31 July, 2020

Accepted 14 August, 2020