

2012년 태풍 볼라벤에 대한 폭풍해일과 파랑 수치모의 Numerical Simulation of Storm Surge and Wave due to Typhoon Bolaven of 2012

김건형* · 류경호** · 윤성범***
Gun Hyeong Kim*, Kyong Ho Ryu** and Sung Bum Yoon***

요지 : 2012년 서해에 내습한 태풍 볼라벤에 의해 발생한 폭풍해일과 파랑을 일본 기상청의 JMA-MSM 기상 예보 자료를 이용하여 수치모의하고, 계산된 해일고를 전국 해안의 항만에서 관측된 폭풍해일 자료와 비교하였다. 폭풍해일과 동시에 발생하는 파랑에 대해서는 해양조사원과 기상청에서 운영하는 해상 파고부이 자료와 비교하여 검증하였다. 기상자료에 따른 폭풍해일과 파랑의 특성을 파악하기 위해 미국 합동태풍경보센터인 JTWC에서 제공하는 best track을 이용하여 생성된 기압장과 바람장을 이용한 수치모의를 수행하고 비교하여 분석하였다. JMA-MSM 기상장은 지형과 선행 배경 기상장이 잘 반영되어 태풍 통과 전후의 전 기간에 걸쳐 파랑과 폭풍해일을 비교적 잘 재현한 반면, JTWC best track을 이용하여 생성된 기상장은 태풍 영향 구역이 협소하여 파랑과 해일고의 시간적 변화 등 전반적인 추세를 반영하지 못하는 등 한계가 있었다. 이 연구를 통하여 폭풍해일과 파랑을 추산하기 위해 신뢰도 높은 기상장이 필수적임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 태풍 볼라벤, JMA-MSM 기상장, JTWC best track, 폭풍해일, 파랑, 수치모의

Abstract : Numerical simulations of the storm surge and waves induced by the Typhoon Bolaven incident on the west sea of Korea in 2012 are performed using the JMA-MSM weather field provided by the Japan Meteorological Agency, and the calculated surge heights are compared with the time history observed at harbours along the various coasts of Korea. For the waves occurring coincidentally with the storm surges the calculated significant wave heights are compared with the data measured using the wave buoys operated by the Korea Hydrographic and Oceanographic Agency and the Korea Meteorological Administration. Additional simulations are also performed based on the pressure and wind fields obtained using the best track information provided by the Joint Typhoon Warning Center, and the calculated results are compared and analyzed. The waves and storm surges calculated using JMA-MSM weather field agree well with the observations because of the better reflection of the topography and the pre-background weather field. On the other hand, the calculated results based on the weather fields produced using the JTWC best track information show some limitations of the general trend of the variations of wave and surge heights. Based on the results of this study it is found that the reliable weather fields are essential for the accurate simulation of storm surges and waves.

Keywords : Typhoon Bolaven, JMA-MSM weather field, JTWC best track, storm surge, wave, numerical simulation

1. 서 론

기후변화로 태풍의 강도가 증가함에 따라 폭풍해일과 이에 동반되는 파랑에 의한 해안재해의 심각성이 증가하고 있다. 이러한 해안재해에 대비하기 위해 안벽이나 방파제 등의 해안 방어시설을 체계적이고 과학적으로 설계하고 설치할 필요가 있다. 이러한 구조적 대책 이외에도 태풍에 의한 해일과 파랑을 미리 정도 높게 예측하여 주민 대피에 활용하는 비구조적 대책도 명행해야 한다. 비구조적 대책의 선결 조건으로

태풍의 진로와 규모 등을 정도 높게 예측(forecast)하는 기상 예보 시스템의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 각 국의 기상청에서는 최상위 슈퍼컴퓨터를 경쟁적으로 도입하고 기상 수치모형의 예측능력을 높이기 위해 모든 노력을 경주하고 있다. 이러한 비구조적 대책과 동시에 해안 재해에 취약한 지역을 파악하고 적절한 규모의 해안 방어 시설물을 설치하는 구조적 대책을 수립하기 위해서는 과거의 해안 재해 관측 자료에 기반한 설계가 선행되어야 한다. 그러나 특정 지역에 대한 장기간의 정도 높은 해일 및 파랑 관측 자료의 확

*(주)HYCERG 부설연구소 선임연구원(Senior Researcher, Research Institute, HYCERG, Hanyang University, ERICA Campus)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 대학원생(Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University)

***한양대학교 건설환경공학과 교수(Corresponding author: Sung Bum Yoon, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do 15588, Korea, Tel: +82-31-400-5144, sbkyoon@hanyang.ac.kr)

보가 쉽지 않은 실정이다. 만약 과거의 신뢰도 높은 기상자료가 가용하다면 이 기상자료를 이용하여 특정 지역의 폭풍해일과 파랑에 대한 장기간의 과거 자료를 수치모의를 통해 추산(hindcast)할 수 있다. 이러한 목적으로 과거 기상자료에 대한 재분석(reanalysis)도 기상 예보만큼이나 그 중요성을 더해 가고 있다. MOF(2019)에서는 과거의 재분석 기상장을 이용하여 파랑을 추산하고, 전국 연안에 대해 일정한 격자 간격으로 재현기간과 방향별 심해설계파를 제시한 바 있다. 이러한 재분석 기상장으로는 일본기상청(JMA, Japan Meteorological Agency)의 JMA-MSM 기상장을 포함하여, 미국국립환경예측센터(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)의 NCEP-CFSR 기상장과 유럽중규모기상예보센터(ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ECMWF-ERA5 기상장 등이 있다. 한국기상청(KMA, Korea Meteorological Administration)에서는 기상 예보에 중점을 두고 있으며, 기상 재분석은 아직 시도하지 않고 있는 듯하다.

본 연구에서는 2012년 서해안에 내습한 태풍 볼라벤(Bolaven)에 대해 JMA-MSM 예보기상장과 JTWC best track에서 제공하는 파라미터를 이용하여 생성한 기상장(이후부터 'JTWC best track 기상장'으로 간략히 표기)을 이용하여 폭풍해일과 파랑을 수치모의하고, 계산된 해일고와 파고를 관측치와 비교하여 해일 및 파랑 수치모형의 재현성과 수치모의에 사용된 기상장 신뢰도를 평가해보고자 한다. JMA-MSM 기상장은 재분석 기상장과 예보 기상장의 2가지가 있다. 예보 기상장은 매 3시간마다 향후 3일간의 예보 기상장을 산출하여 1시간 간격으로 제공하며, 재분석 기상장은 지난간 기간의 기상을 재분석하여 1시간 간격으로 제공한다. 예보 기상장은 무료로 제공(<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/data/gpv>)되나, 재분석 기상장은 1개월 단위로 유료로 제공(<http://www.jmbsc.or.jp/jp/online/c-onlineF.html>)된다. 본 연구에서는 예보 기상장의 3시간마다 주어지는 각 3일간의 첫 3시간 자료만을 추출하고 이를 연결하여 1시간 간격의 기상장을 생성하여 수치모의에 사용하였다. 이렇게 생성된 기상장은 재분석 기상장과 거의 동일한 수준임을 확인하였으며, 현장 실무에의 적용에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

이 연구의 대상으로 선정한 2012년의 태풍 볼라벤은 제주도 서쪽을 통해 북상하면서 제주도 서귀포항 외곽 방파제에 큰 피해를 입히고, 계속 북상하여 2011년 태풍 무이파에 의해 파괴된 가거도항 방파제에 연이어 피해를 입힌 바 있다. Fig. 1은 태풍연구센터(Typhoon Research Center, www.typhoon.or.kr)에서 제공하는 태풍 볼라벤의 이동경로와 풍속 25 m/s 및 15 m/s의 영향범위이다.

Fig. 1에 제시된 시간은 UTC(Coordinated Universal Time)이다. 태풍 볼라벤은 UTC로 2012년 8월 20일 필리핀 동부 해상에서 발생하여 북서진한 다음, 8월 28일에는 제주 남부

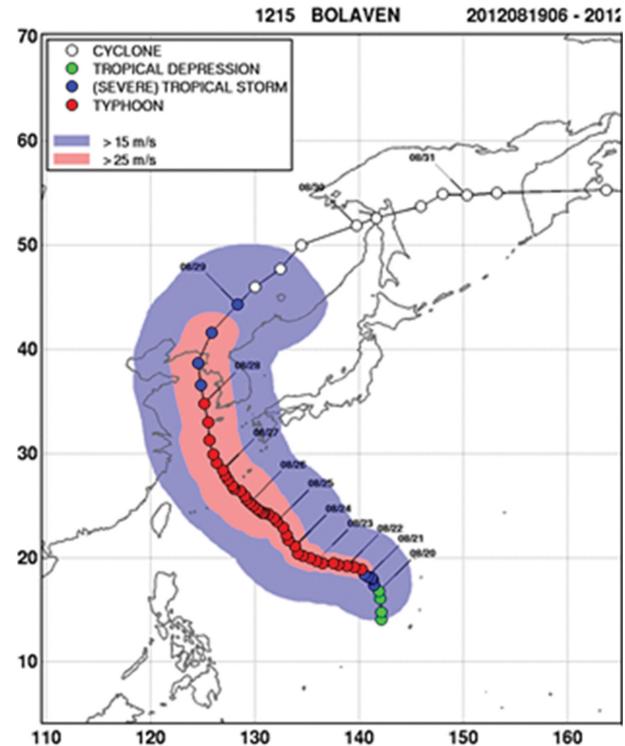


Fig. 1. Track of Typhoon Bolaven of 2012 (Captured from Typhoon Research Center).

해상에서 북쪽으로 진로를 변경하여 서해상을 관통하고 8월 27일에는 북한의 신의주 남쪽 해안에 상륙하였다. 해안에 상륙한 태풍은 북동진하여 만주와 러시아의 연해주를 거쳐 오헬즈크해로 빠져 나갔다.

2. 기상장

태풍 볼라벤 통과 시 폭풍해일과 파랑을 수치모의하기 위한 입력 기상장으로 일본 기상청(Japan Meteorological Agency)에서 제공하는 JMA-MSM 예보 기상장을 사용하였다. JMA-MSM 기상장은 일본과 한국을 포함하는 주변 해역을 대상으로 하는 지역 기상장으로서, 초기인 2002년에는 약 10 km 격자로 운영되다가 2006년부터는 5 km 격자로 세분하여 1시간 간격의 상세한 기상장을 제공하고 있다. 이 기상장은 해양수산부(2019)에서 전국 심해설계파 산출을 위한 태풍 시의 파랑 추산에 사용되어 그 타당성이 확보된 바 있다. 또한 비교를 위해 미국 합동태풍경보센터(JTWC, Joint Typhoon Warning Center)에서 제공하는 best track (이후부터 JTWC-BT로 간단히 표기) 정보를 이용한 기압장과 바람장을 이용한 수치모의도 수행하였다. JTWC-BT 정보는 태풍 이동경로를 축으로 하여 해역을 4개 구역으로 나누고 각 구역마다 풍속이 34 knot, 50 knot, 64 knot가 되는 반경 및 최대풍속과 중심기압 및 태풍의 영향반경 그리고 배경기압 등을 제공하여 좀 더 현실적인 바람장을 구할 수 있도록 개선되었다. Table 1은 태풍 볼라벤이 우리나라 해상에 영향을 미치기 시작하는 2012

Table 1. Best track information provided by JTWC for Typhoon Bolaven of 2012 (<http://www.metoc.navy.mil/jtvc/jtvc.html?best-tracks>)

Time (UTC)	Lat. (°N)	Long. (°E)	Max. wind speed (knot)	Central pressure (hPa)	Wind intensity for the radii (knots)	Radii of the quadrants				Pressure of the last closed isobar (hPa)	Radius of the last closed isobar (km)
						1st quad. (km)	2nd quad. (km)	3rd quad. (km)	4th quad. (km)		
2012082712	31.3	125.5	70	970	34	314.8	314.8	277.8	277.8	1013	635.2
2012082712	31.3	125.5	70	970	50	185.2	185.2	185.2	185.2	1013	635.2
2012082712	31.3	125.5	70	970	64	101.9	101.9	101.9	101.9	1013	635.2
2012082718	33	125.2	70	970	34	314.8	314.8	277.8	277.8	1013	651.9
2012082718	33	125.2	70	970	50	148.2	148.2	148.2	148.2	1013	651.9
2012082718	33	125.2	70	970	64	64.8	64.8	64.8	64.8	1013	651.9
2012082800	34.8	124.7	55	982	34	314.8	314.8	277.8	277.8	1013	642.6
2012082800	34.8	124.7	55	982	50	148.2	148.2	148.2	148.2	1013	642.6
2012082806	36.8	124.6	55	982	34	314.8	314.8	277.8	277.8	1013	663.0
2012082806	36.8	124.6	55	982	50	148.2	148.2	148.2	148.2	1013	663.0
2012082812	38.9	125	45	989	34	166.7	203.7	203.7	166.7	1013	16.7
2012082818	41.5	125.6	35	996	34	166.7	203.7	203.7	166.7	1013	18.5
2012082900	44.2	127.3	30	1000	34	129.6	166.7	166.7	129.6	1013	46.3

Table 2. Best track auxiliary information provided by ADCIRC-ASWIP.F for Typhoon Bolaven of 2012

Time (UTC)	Wind intensity for the radii (knots)	The selection of radii for that particular isotach				Rmax of the quadrants				Holland B	
		1st quad.	2nd quad.	3rd quad.	4th quad.	1st quad. (km)	2nd quad. (km)	3rd quad. (km)	4th quad. (km)		
2012082712	34	0	0	0	0	70.6	91.3	146.3	118.7	1.000	
2012082712	50	0	0	0	0	79.3	104.1	100.9	81.5	1.000	
2012082712	64	1	1	1	1	57.6	57.6	57.6	57.6	1.164	
2012082718	34	0	0	0	0	77.0	89.6	167.4	146.5	1.000	
2012082718	50	0	0	0	0	60.6	69.8	87.4	76.7	1.000	
2012082718	64	1	1	1	1	49.1	49.1	49.1	49.1	1.164	
2012082800	34	0	0	0	0	204.6	61.3	152.2	120.2	1.000	
2012082800	50	1	1	1	1	74.5	74.5	74.5	74.5	1.000	
2012082806	34	0	0	0	0	50.7	53.9	152.2	145.2	1.000	
2012082806	50	1	1	1	1	74.5	74.5	74.5	74.5	1.000	
2012082812	34	1	1	1	1	46.1	56.5	56.5	46.1	1.000	
2012082818	34	1	1	1	1	116.1	142.0	142.0	116.1	1.000	
2012082900	34	1	1	1	1	116.1	142.0	142.0	116.1	1.000	

년 8월 27일 12:00시(UTC) 이후의 JTWC-BT 정보이다. 본 연구의 폭풍해일 수치모의와 파랑 수치모의에 사용되는 JTWC-BT 바람장은 폭풍해일 수치모형인 ADCIRC의 option에서 NWS를 기본형인 8(Symmetric vortex model)로 선택하고 Table 1의 정보를 입력하여 폭풍해일 수치모의를 수행한 다음, ADCIRC에서 생성해준 기본형 바람장 파일을 파랑 수치모형인 unSWAN에 공급하여 파랑을 수치모의 하였다. 또한 Suh and Kim(2012)에서 사용한 동적 비대칭 바람장을 얻기 위해 ADCIRC에서 제공하는 보조 프로그램인 ASWIP.F에 Table 1의 정보를 넣어 Table 2에 보인 바와 같은 추가적인 정보를 얻고, 이 추가 정보를 ADCIRC에 option NWS=19 (Dynamic asymmetric model)를 선택하여 입력한 다음, 기본형과 같은 방법으로 unSWAN과 바람장을 공유하여 파랑 수치모의를 수행하였다. JMA-MSM 기상장과 JTWC-BT에 대한 자세한 정보는 각각 <http://www.jmbsc.or.jp/jp/online/nonline0.html>과 <http://www.metoc.navy.mil/jtvc/jtvc.html?best-tracks>에서 얻을 수 있다.

tracks에서 얻을 수 있다.

Fig. 2는 태풍 볼라벤이 서해상을 관통하여 인천 부근 해역을 통과할 때인 2012년 8월 28일 00:00, 06:00, 12:00 (UTC)의 기압장을 JMA-MSM과 JTWC-BT로부터 구하여 비교한 것이다며, Fig. 3은 바람장을 비교한 것이다. Fig. 2와 Fig. 3에 표시된 태풍 경로는 JMA-MSM 기상장에는 일본 기상청의 최적경로인 RSMC 경로를, JTWC-BT 기상장에는 JTWC에서 제공하는 경로를 각각 표시하였다. JMA-MSM 풍속은 10분 지속 풍속인 반면 JTWC-BT로부터 구한 풍속은 1분 지속 풍속이므로 10분 지속 풍속으로 변환하여 도시하였다. 그림에 보인 바와 같이 JMA-MSM의 기압장과 바람장이 JTWC-BT에 의한 것보다 영향범위가 훨씬 넓고 태풍 외곽인 배경장에서의 기상 변화도 나타난다. JTWC-BT에 의한 기상장 중에서 기본형은 영향반경과 최강풍속 등 모든 면에서 약하게 나타났으며, 비대칭형은 기압의 영향범위나 풍속의 강도가 기본형에 비해 크게 증가하였으나 JMA-MSM에 비하

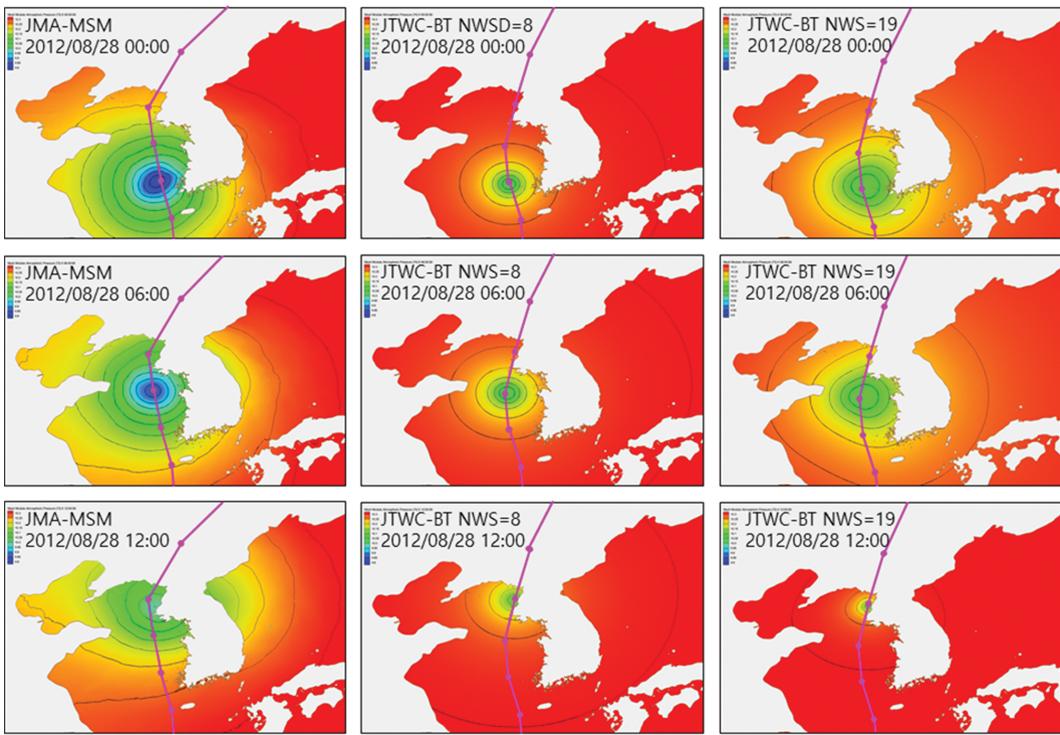


Fig. 2. Comparison of pressure fields for Typhoon Bolaven on 28 Oct. 2018: JMA-MSM (left panels), JTWC best track NWS=8 (middle panels), JTWC best track NWS=19 (right panels).

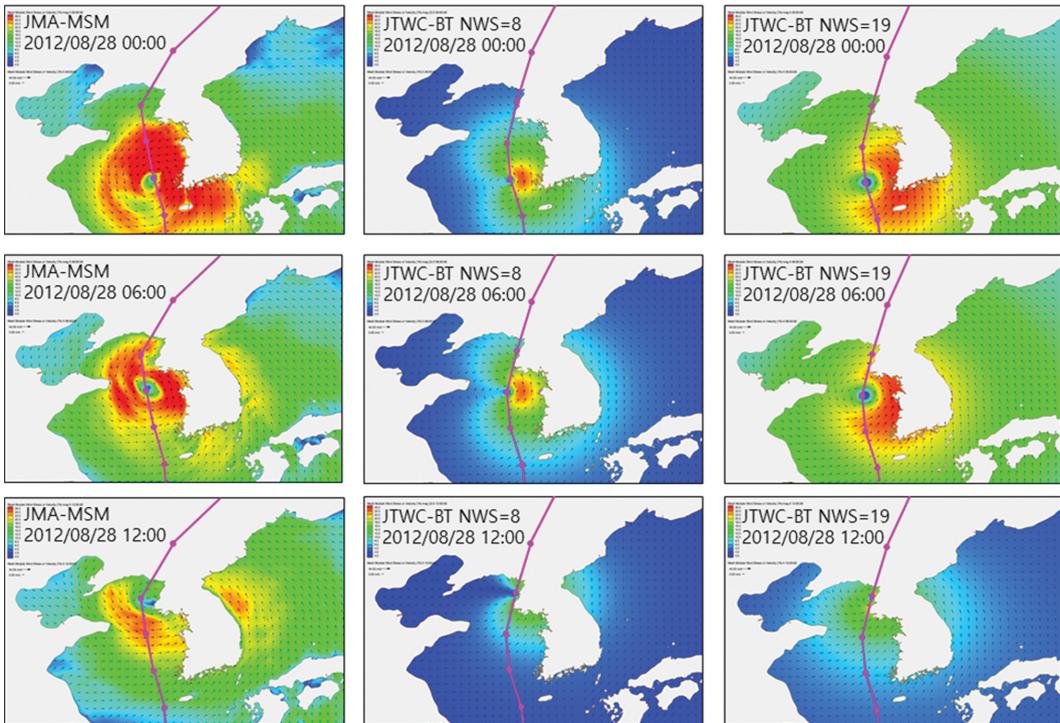


Fig. 3. Comparison of wind fields for Typhoon Bolaven on 28 Oct. 2018: JMA-MSM (left panels), JTWC best track NWS=8 (middle panels), JTWC best track NWS=19 (right panels).

면 약하며, 특히 태풍 경로의 좌측 가항 해역의 풍속이 매우 약하다. 어느 기상장이 더 현실적인지는 각 기상장을 이용하여 폭풍해일 및 파랑 수치모의를 실시하고 그 결과를 관측치와 비교하여 판단할 수 있다.

3. 수치모의

본 연구에서 폭풍해일을 수치모의하기 위한 수치모형으로 Luettich et al.(1992, 1994)에 의해 개발되어 전 세계적으로

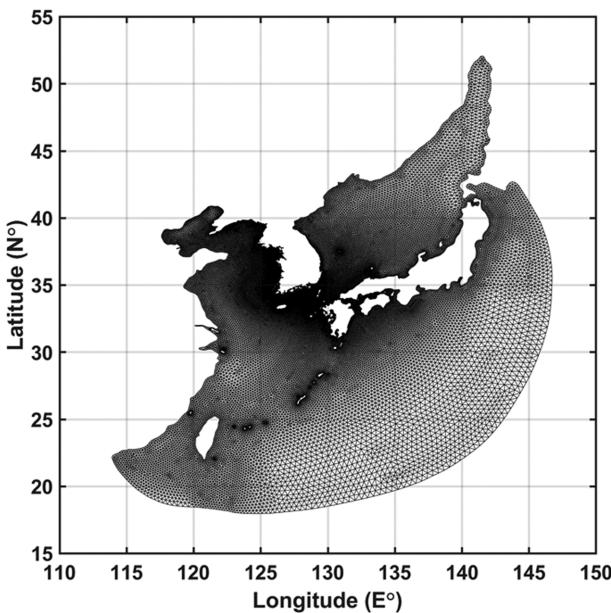


Fig. 4. Finite element mesh for simulation of Typhoon Bolaven of 2012.

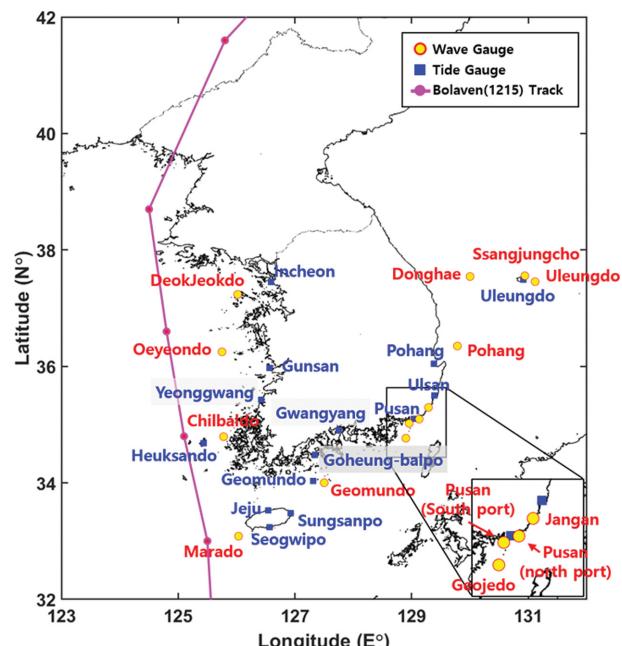


Fig. 5. Location of comparison between measured and calculated storm surge and significant wave.

널리 보급된 ADCIRC ver.53.04를 선정하였다. ADCIRC는 과동방정식 형태의 연속방정식을 채택한 천수방정식을 지배 방정식으로 하는 유한요소모형으로 기압과 바람 변화에 의한 폭풍해일은 물론이고, 조석과 조류 등의 해수유동과 하천 흐름 등의 천수 흐름을 해석할 수 있다. 한편 파랑 재현을 위한 수치모형으로는 Delft University에서 개발하고 수많은 현장에 적용되어 검증이 된 유한요소모형인 unSWAN ver.41.10을 이용하였다. 이 수치모형들의 자세한 지배방정식과 수치기법에 대해서는 다양한 연구논문 등을 통해 잘 정립되어 있으므로 생략한다. 본 연구에서 사용된 ADCIRC와 unSWAN의 과거 version과의 가장 큰 차이는 강풍 시 바람의 에너지 전달 계수인 항력계수 C_d 가 과거 version에 비해 크게 약화되었다는 점이다. 과거 SWAN ver.40.91에서는 Wu(1982)의 C_d 를 사용하여 C_d 가 해면상 10 m 높이의 풍속 U_{10} 에 비례하여 증가하는 반면, 현재의 C_d 는 U_{10} 이 30 m/s까지는 증가하나, 그 이상의 풍속에 대해서는 C_d 가 오히려 감소하는 경향을 보인다(Akbar et al., 2017; Qiao et al., 2019; Wang et al., 2019). 폭풍해일과 파랑 수치모의 시 바닥마찰과 기타 모든 상수는 원래 ADCIRC와 unSWAN에서 제공하는 기본 값을 조정하지 않고 그대로 사용하였다. 또한 unSWAN을 이용한 파랑 수치모의 시 Komen et al.(1984)의 바람 에너지 전달 관계식을 선택하였다.

Fig. 4는 폭풍해일과 파랑을 수치모의하기 위한 유한요소망을 보여준다. 총 173,202개의 요소와 총 93,486개의 절점을 사용하였다. Fig. 5는 수치모의 결과와 관측치를 비교하는 정점의 위치를 보여주는 바, 폭풍해일에 대해서는 태풍의 강풍 영역인 제주도 해역과 서해 해안에 위치하는 주요 항을 포함하여 남해안과 동해안의 항만 등 총 14개 정점에서 관측

된 조위 관측 기록으로부터 예상조위를 제거한 순수 폭풍해일 시계열(KHOA, 2012)과 수치모의 결과를 비교하였으며, 파랑에 대해서는 해양조사원과 기상청에서 운영하는 외해 및 연안 파고부이 관측점 및 Jeong(2017)의 독자적인 파고 관측점 등 총 13개 정점에서 관측된 유의파고를 수치모의 결과와 비교하였다. 2012년도에는 파고 부이가 널리 보급되지 않아 관측자료가 많지 않으므로 당시 입수 가능한 파고 관측 자료는 거의 다 비교에 사용되었다. 이를 중 남해 동부와 동해의 관측점 들은 태풍 영향이 크지 않았으나 각 기상장의 시공간적 신뢰도를 평가할 목적으로 포함하였다.

4. 결과 및 분석

폭풍해일은 기압과 바람의 복합 작용으로 발생하는 반면, 파랑은 바람에 의해서만 발생한다. 따라서 파랑장에 대한 관측치와의 비교를 통해 바람장의 신뢰성을 먼저 파악하고 나면, 후속되는 폭풍해일 수치모의에서 기상장과 수치모의의 정밀도 검증 시 기압장의 기여도를 따로 평가할 수 있어 편리하다. 그러므로 파랑 수치모의를 먼저 수행하고 관측치와 비교하여 평가한다.

Fig. 6은 태풍 볼라벤이 북상하면서 초기에 영향을 미치는 제주 및 남해 해역에 위치하는 마라도, 거문도, 거제도, 부산 남항, 부산 북항 및 장안 파고 부이 관측점에서 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. 그럼에 보인 바와 같이 JMA-MSM 바람장을 이용한 경우 초기에는 파고가 약간 과대평가되었으나 전반적으로 파고가 잘 재현되었음을 알 수 있다. 그러나 JTWC best track 바람장을

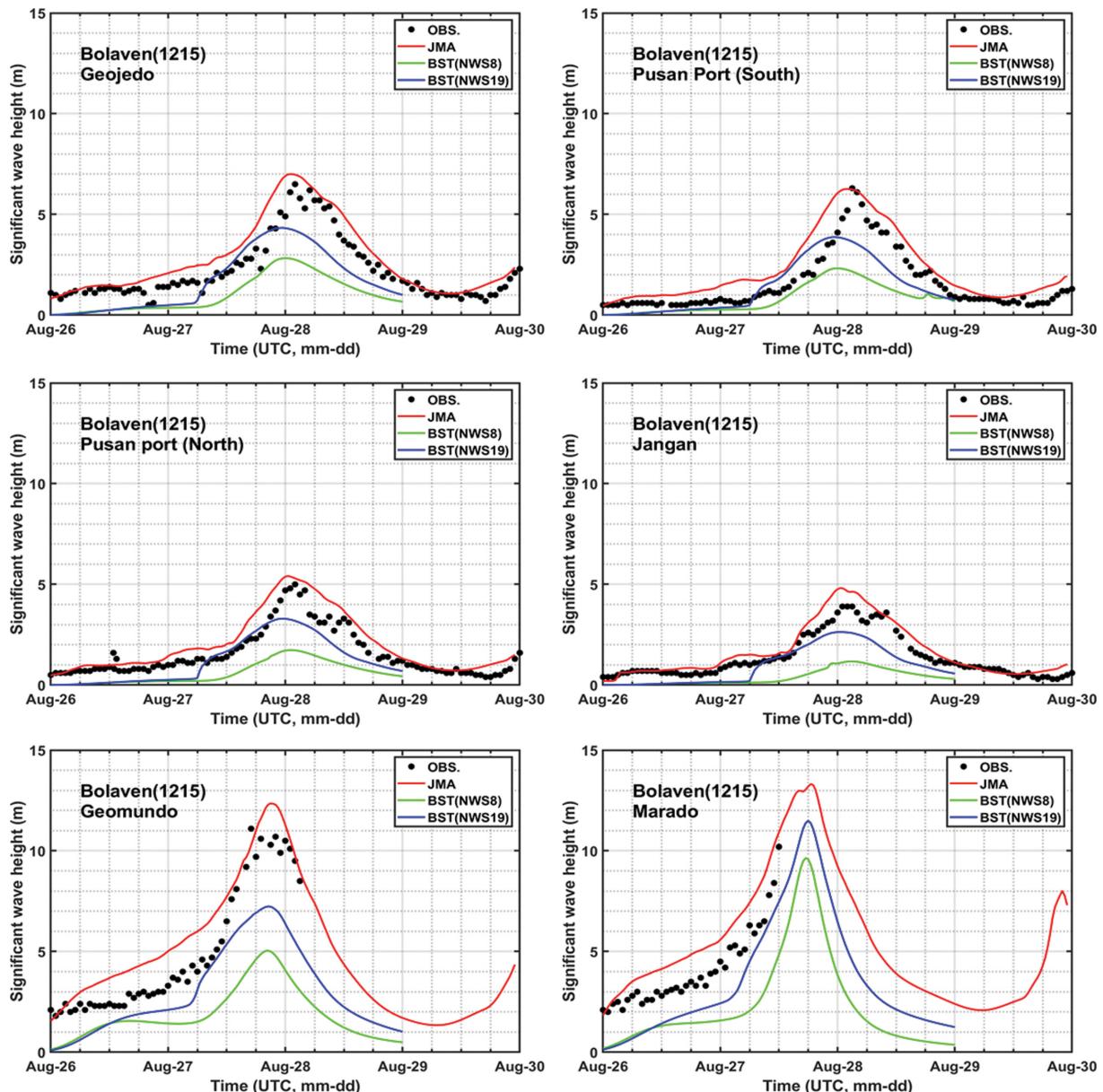


Fig. 6. Comparison of significant wave heights calculated using JMA-MSM and JTWC best tracks against observed data at buoys on south sea for Typhoon Bolaven.

이용한 경우 태풍 영향권이 좁고 풍속이 약해 태풍 중심으로부터 멀리 떨어질수록 계산된 파고가 과소평가되었다.

Fig. 7은 태풍이 북상하면서 다음으로 영향을 미치는 서해 해역에 위치하는 칠발도, 외연도 및 덕적도 파고부이에서 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. 칠발도 파고부이는 계산된 파고가 초기로부터 첨두시까지 과대평가되는 경향이 있다. 그러나 첨두를 지난 8월 28일 06:00 이후의 파고 시계열은 관측치와 잘 일치하고 있다. 외연도 파고부이에서는 8월 28일 이후 결측이 발생하여 비교 평가가 어려우나, 칠발도에서의 파고 시계열과 유사할 것으로 추정해볼 수 있다. 칠발도와 외연도 파고가 초기에 과대평가되는 원인으로는 태풍 중심이 해당 관측점을 통과하기 전의 동풍 계열의 바람장이 실제보다 강한 것 때문으로 유추

해 볼 수 있다. 반면 태풍 통과 후에는 남서풍이 불게 되는데 계산된 파고가 관측치와 잘 일치하는 것으로 보아 바람장의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다. 따라서 태풍 볼라벤에 대한 기상장 재분석 시 이러한 경향을 고려하면 재분석된 기상장의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 덕적도 파고 부이에서의 파고를 비교해보면 JMA-MSM 바람장을 사용한 경우가 JTWC best track 바람장을 이용한 경우 보다 전반적으로 관측치에 더 근접하게 나타났다. 서해상의 3개 정점에서 관측된 파고 시계열을 살펴보면 모두 파고의 첨두가 2번 나타나는 공통점이 있다. 이는 볼라벤과 같이 최대 풍 반경이 매우 큰 태풍이 해안으로부터 상당한 거리를 두고 해안선과 평행하게 이동할 때 태풍의 이동경로 가까이에 있는 관측점에서 나타나는 현상으로서, 태풍 중심 통과 직전의

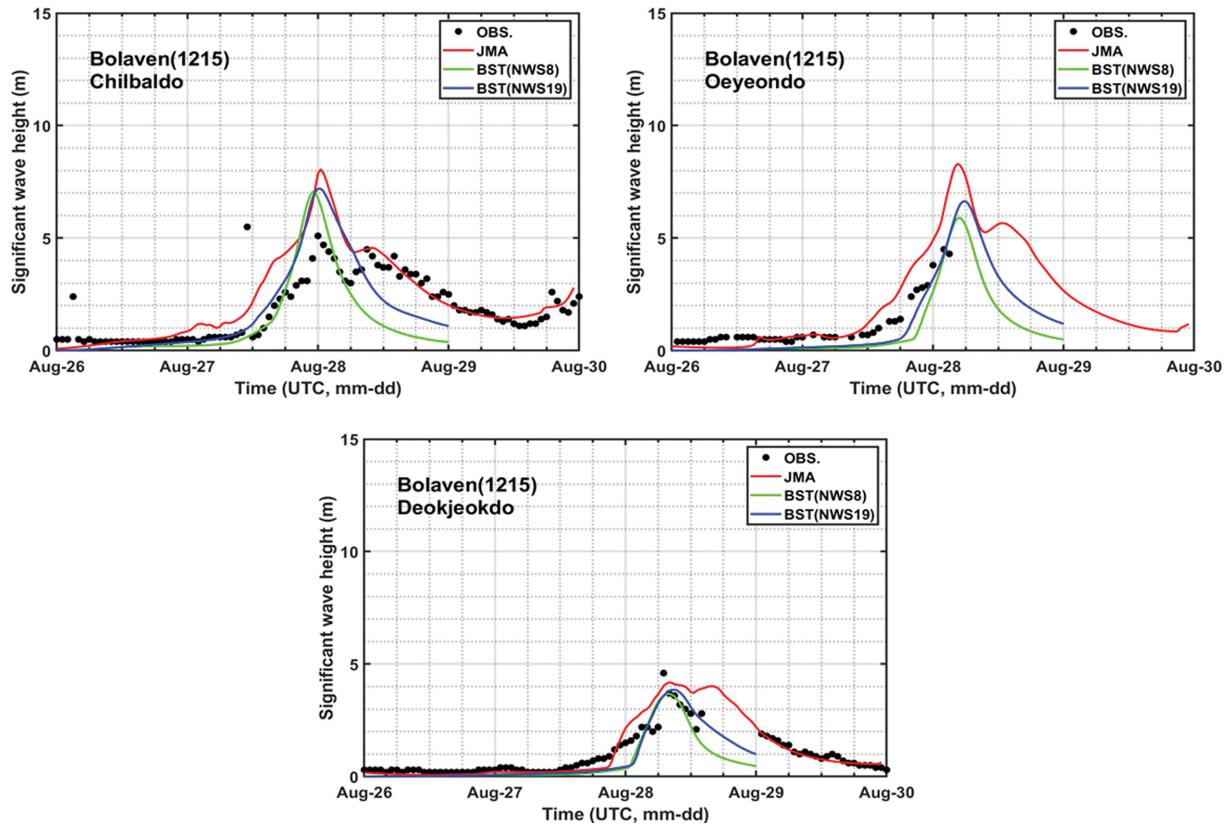


Fig. 7. Comparison of significant wave heights calculated using JMA-MSM and JTWC best tracks against observed data at buoys on west sea for Typhoon Bolaven.

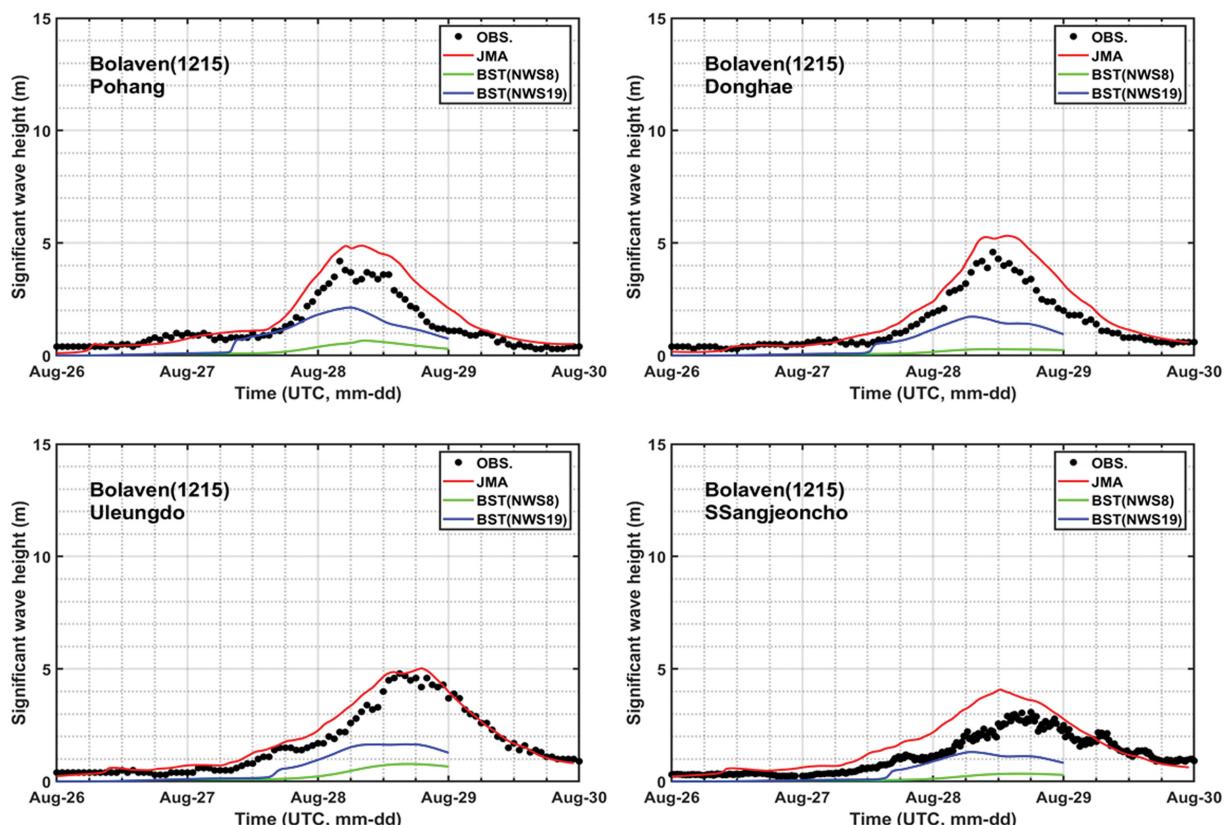


Fig. 8. Comparison of significant wave heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at buoys on east sea for Typhoon Bolaven.

회전류에 의한 강풍의 풍향이 태풍 통과 직후의 풍향과 반대이기 때문에 관측된다. 이러한 현상은 태풍이 느리게 이동할수록 두드러진다. Fig. 8은 동해상에 위치하는 포항, 동해, 울릉도 파고 부이와 쌍정초 해양관측소에서 태풍 볼라벤 내습 시 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. JMA-MSM 바람장을 사용한 경우 전반적으로 계산된 파고가 관측치와 잘 일치하고 있다. 그러나 JTWC best track 바람장을 이용한 경우에는 계산된 파고가 과소평 가되었다. 이는 JTWC best track에 의한 바람장의 영향권이 실제보다 협소하여 서해로 통과하는 태풍으로부터 멀리 떨어진 동해상에는 거의 영향을 미치지 못하기 때문이다. 이상의 파랑 수치모의와 관측치와의 비교를 통해 태풍 볼라벤 내습 시 우리나라 모든 해역에서 JMA-MSM 바람장의 신뢰성이 높음을 알 수 있었다. 반면 JTWC의 best track에 의한 바람

장은 영향 반경이 실제보다 작아 태풍 중심으로부터 멀리 떨어질수록 그 신뢰도가 낮아짐을 알 수 있었다.

다음으로는 바람장에 대한 평가가 이루어진 상태에서 기압장의 신뢰도를 평가하기 위해 폭풍해일 수치모의를 수행하고 관측치와 비교하였다. Fig. 9는 제주도 해안과 전라남도 남해안에 위치하는 서귀포, 성산포, 제주, 거문도, 고흥 발포항과 광양항에서 태풍 볼라벤 내습 시 관측된 폭풍해일고의 시계열과 JMA-MSM 기상장 및 JTWC best track 정보를 이용한 기상장을 사용하여 ADCIRC 수치모형에 의해 계산된 폭풍해일고의 시계열을 비교한 것이다. 그럼에 보인 바와 같이 JTWC best track 기상장은 태풍 영향권이 협소하여 태풍 중심으로부터 멀리 떨어질수록 전반적으로 폭풍해일이 과소평 가되었다. 반면에 JMA-MSM 기상장을 사용하면 태풍 영향 기간 이전부터 태풍이 통과한 이후의 전 기간에 대해 관측치

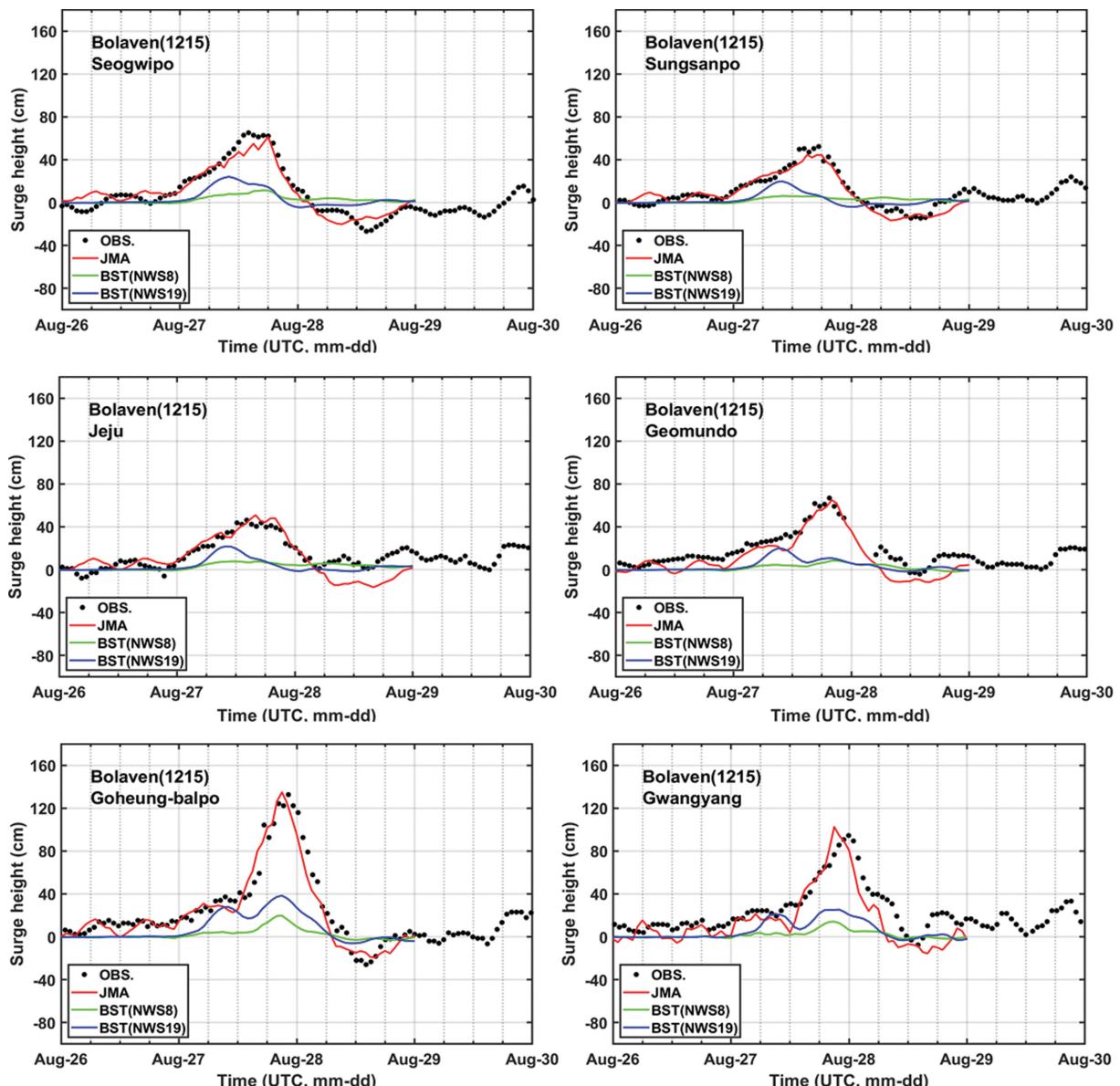


Fig. 9. Comparison of storm surge heights calculated using JMA-MSM and JTWC best tracks against observed data at harbours along central-south coast for Typhoon Bolaven.

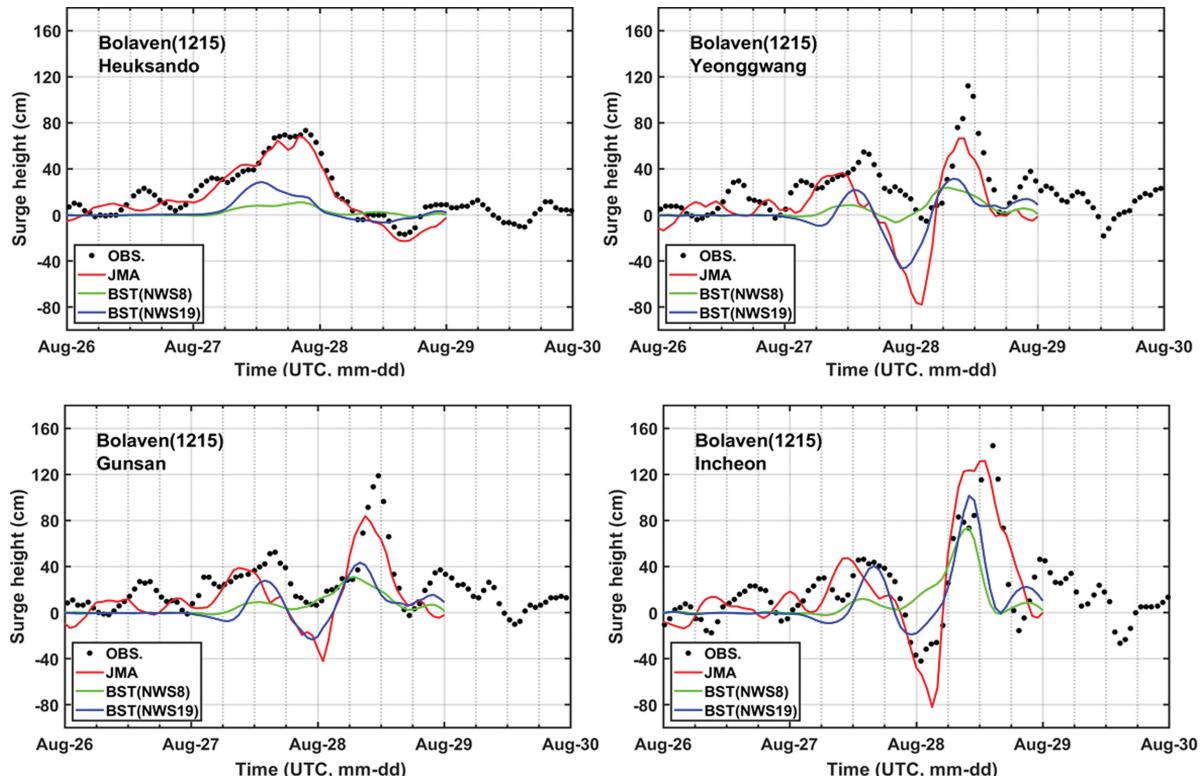


Fig. 10. Comparison of storm surge heights calculated using JMA-MSM and JTWC best tracks against observed data at harbours along west coast for Typhoon Bolaven.

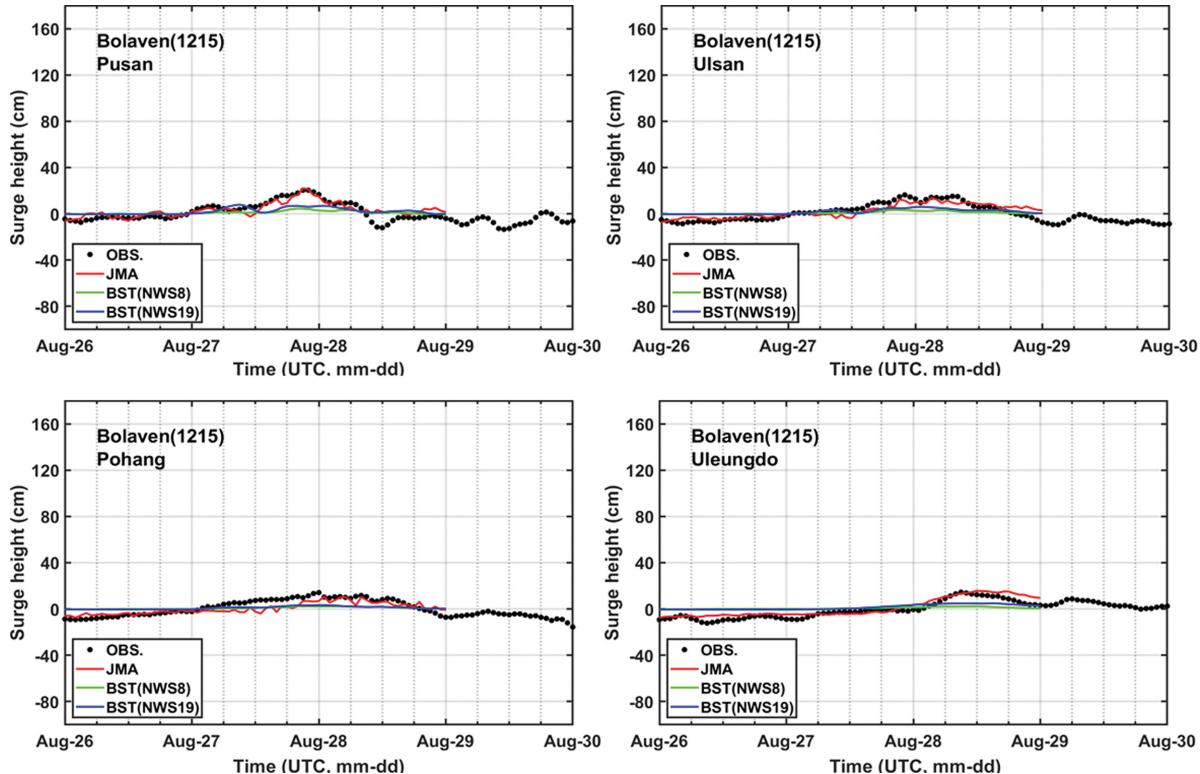


Fig. 11. Comparison of storm surge heights calculated using JMA-MSM and JTWC best tracks against observed data at harbours along eastern-south and east coasts for Typhoon Bolaven.

와 매우 잘 일치하는 결과를 보인다. 폭풍해일은 기압과 바람이 모두 영향을 미치므로 폭풍해일 수치모의의 정밀도는 사

용하는 기상장의 신뢰도에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 서해안에 위치하는 흑산도, 영광, 군산 및 인천

검조소에서의 폭풍해일고를 비교한 것으로서, 태풍 중심부가 가까이 통과하는 흑산도에서의 폭풍해일은 관측치와 잘 일치 한다. 흑산도와 같이 해상에 고립된 소규모 섬에서는 바람에 의한 취송류를 저지하여 해안에서 해수위를 상승시키는 취송 효과는 미미하고, 태풍 중심부 저기압에 의한 수위상승이 폭풍해일의 주된 요인으로 작용할 것으로 예상되는 바, 이러한 물리현상이 수치모의에서 잘 재현되었다고 판단된다. 반면에 태풍 중심에서 상당한 거리를 유지하는 서해안 검조소의 경우 저기압에 의한 수위상승보다는 바람에 의한 영향이 우세하다. 이 경우 바람장의 신뢰도가 수치모의의 성패를 좌우하게 될 것이다. 그림에 보인 바와 같이 서해안 상의 영광, 군산 및 인천에서의 계산된 폭풍해일은 전반적으로 관측치를 잘 재현하지 못했다. 이는 서해안의 복잡한 해안선과 수많은 섬들을 수치모의에서 잘 표현하지 못한 이유도 있겠으나, 주된 원인은 바람장의 신뢰도가 낮기 때문인 것으로 판단된다. 서해안에서는 태풍 중심이 각 관측점을 통과하기 수 시간 전에는 육지에서 바다 쪽으로 부는 동풍 계열의 바람이 우세하므로 바람의 취송효과로 인해 해안 주변의 수체가 바다 쪽으로 끌려가 해수위가 하강하고, 태풍이 통과하면서 수위가 상승하기 시작하여 태풍 통과 후 반대 방향의 바람이 해안으로 불면서 해일고가 최대에 도달하는 것이 일반적이다. 이러한 현상은 그림에 보인 바와 같이 서해안 상의 모든 관측점에서 일관적으로 나타났다. 다만 해수위 하강과 상승고가 정량적으로 관측치와 잘 일치하지 않는 것으로 보아 바람장이 개선될 필요성이 있어 보인다. JMA-MSM 기상장을 사용한 경우 태풍 통과 전 해수위 하강이 과대평가되는 경향이 있으며, 따라서 태풍 통과 후의 해수위 상승이 제한되었다. 이는 파랑 수치모의 결과와도 부합되는 결과로서 태풍 도달 전의 동풍 계열의 풍속이 실제보다 과대평가된 결과로 판단된다.

Fig. 11은 동남 해안에 위치하는 부산, 울산과 동해안에 위치하는 포항 및 울릉도 항에서의 폭풍해일고를 비교한 것으로서, 태풍 영향권으로부터 멀리 떨어져 해일고가 매우 낮게 나타났다. JMA-MSM 기상장을 사용한 경우가 JTWC best track을 사용한 경우보다 실제에 더 가까운 해일고를 준다.

5. 결 론

본 연구에서는 2012년 8월 제주도 서쪽 해상을 지나 서해안에 내습하여 제주도와 서해 남부해안에 큰 피해를 입힌 태풍 볼라벤에 의한 폭풍해일과 파랑을 수치모의하고, 관측치와의 비교를 통해 기상장(기압장과 바람장)의 신뢰도를 평가하였다. 기상장으로는 3차원 기상 수치모의에 의해 산출된 일본 기상청의 JMA-MSM 예보 기상장과 소수의 태풍 정보만으로 기상장을 간편하게 생성하는 미국합동태풍경보센터의 JTWC best track 기반 기상장을 사용하였다. 폭풍해일 수치모형으로는 유한요소모형인 ADCIRC를, 파랑 수치모형으로는 역시 유한요소모형인 unSWAN의 최신 버전을 이용하였

다. 폭풍해일과 파랑 수치모의 시 바닥마찰과 기타 모든 경험 상수는 원래 ADCIRC와 unSWAN에서 제공하는 기본 값을 조정하지 않고 그대로 사용하였다. 본 연구에서는 우리나라 서해, 남해, 동해의 전 해역에 고르게 분포한 파고 부이 관측자료와 조위 관측자료를 입수하고 수치모의 계산치와의 비교를 통해 각종 기상장의 전반적인 시공간적 신뢰도를 평가하였다.

먼저 바람장의 신뢰도를 평가하기 위해 바람 만에 의해 결정되는 파랑에 대해 관측치와 계산치를 13개 정점에서 비교한 결과, 3차원 JMA-MSM 기상장은 태풍이 직접 통과하는 서해상의 강풍 영역에서 파고가 과대평가되었다. 그러나 태풍 경로에서 어느 정도 벗어난 남해안과 동해안의 넓은 해역에 걸쳐 파고 부이 관측 자료를 잘 재현하였다. 반면 JTWC best track 기반 기상장은 태풍의 영향 해역이 JMA-MSM 보다 협소하여 대부분의 해역에서 파고가 과소평가되었다. 전반적으로는 JMA-MSM 예보 바람장이 JTWC best track 바람장 보다 파고 재현에 있어서 좀 더 우수한 결과를 준다. 그러나 JMA-MSM 바람장도 재분석을 통해 개선할 필요성이 있다. 한편 14개 항만에서 관측된 폭풍해일과 수치모의 결과를 비교한 결과, 3차원 JMA-MSM 기상장은 태풍 경로 상의 육지와 바다 등의 지형과 선행 배경 기상장이 잘 반영되어 태풍 통과 전후의 전 기간에 걸쳐 폭풍해일 시계열을 잘 재현한 반면, JTWC best track 기상장은 태풍 자체에 의한 기압과 바람 정보만 제공하므로 태풍 영향 구역 내에서만 영향을 미쳐 해일고의 시간적 변화 등 전반적인 추세를 반영하지 못하는 등 한계가 있었다.

References

- Akbar, M., Kanjanda, S. and Musinguzi, A. (2017). Effect of bottom friction, wind drag coefficient, and meteorological forcing in hindcast of Hurricane Rita storm surge using SWAN + ADCIRC model. *J. Mar. Sci. Eng.*, 5(38), doi:10.3390/jmse5030038.
- Jeong, W.M. (2017). Private communication.
- Komen, G.J., Hasselmann, S. and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2012). Oceanic abnormal phenomena report, Vol.2.
- Luettich, R., Westerink, J. and Scheffner, N. (1992). ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1. Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg MS: Coastal Engineering Research Center.
- Luettich, R., Westerink, J. and Scheffner, N. (1994). ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 2. User's manual for ADCIRC-2DDI. Vicksburg MS: Coastal Engineering Research Center.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2019). Report on estimation of

- deep water design waves of Korea. 117-149 (in Korean).
- Qiao, W., Song, J., He, H. and Li, F. (2019). Application of different wind field models and wave boundary layer model to typhoon waves numerical simulation in WAVEWATCH III model. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 71(1), 1657552, DOI:10.1080/16000870.2019.1657552.
- 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).
- Wang, Z., Gong., Y., Cui, J., Dong, S. and Wu, K. (2019). Effect of the drag coefficient on a typhoon wave model. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(6), 1795-1804.
- Wu, J. (1982). Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *J. Geophys. Res.*, 87(C12), 9704-9706.

Received 6 August, 2020

Revised 20 August, 2020

Accepted 21 August, 2020