

2018년 태풍 콩레이에 대한 폭풍해일과 파랑 수치모의 Numerical Simulation of Storm Surge and Wave due to Typhoon Kong-Rey of 2018

권갑근* · 조명환** · 윤성범***

Kab Keun Kwon*, Myeong Hwan Jho** and Sung Bum Yoon***

요지 : 2018년 남해안에 내습한 태풍 콩레이에 의해 발생한 폭풍해일과 파랑을 일본 기상청의 기상자료인 JMA-MSM 기상 예보 자료를 이용하여 수치모의하고 남동 해안의 항만에서 관측된 폭풍해일 시계열 자료와 비교 검증하였다. 폭풍해일과 동시에 발생하는 파랑에 대해서는 국립해양조사원과 기상청에서 운영하는 해상 파고부이 자료 및 한국해양과학기술원에서 관측한 연안 AWAC 파고계 자료와 비교하여 검증하였다. 기상자료에 따른 폭풍해일과 파랑의 정밀도를 파악하기 위해 미국 합동태풍경보센터인 JTWC에서 제공하는 best track을 이용하여 생성된 기압장과 바람장을 이용한 수치모의를 수행하고 비교 분석하였다. 이 연구를 통하여 정도 높은 폭풍해일과 파랑을 추산하기 위해 신뢰도 높은 기상장이 필수적임을 알 수 있었다.

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

Abstract : Numerical simulations of the storm surge and waves induced by the Typhoon Kong-Rey incident on the south coast of Korea in 2018 are conducted 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 south-east coast. 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 KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency) and the KMA (Korea Meteorological Administration), and the data observed at AWAC stations of the KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology). Additional simulations are also performed based on the pressure and wind fields obtained using the best track information provided by the JTWC (Joint Typhoon Warning Center) of the United States, and the results are compared and analyzed. 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 Kong-Rey, JMA-MSM weather field, JTWC best track, storm surge, wave, numerical simulation

1. 서 론

기후변화로 평균해면이 상승하고 폭풍해일과 파랑의 강해지면서 이들의 복합 작용으로 인한 해안 침수 피해가 빈번해지고 있다. 현실성 있는 복합재해 평가를 위해 태풍에 의한 폭풍해일과 이에 동반되는 파랑의 정도 높은 산정이 필요하다. 폭풍해일은 기압과 바람의 시공간적 변동에 의해 발생한다. 파랑은 주로 바람에 의해 발생하며, 바람의 강도와 취송 거리 및 지속시간에 따라 변화한다. 이러한 폭풍해일과 파랑의 발생 원인인 기압과 바람은 3차원적으로 거동하므로 그 예

측과 후측이 모두 쉽지 않다. 기상변화 중 가장 큰 피해를 유발하는 태풍의 경우 기압장과 바람장을 태풍의 이동경로, 중심부 기압, 최대풍 반경, 최대 풍속 등의 몇 가지 태풍 파라미터만을 제공하는 best track 정보를 이용하여 구하는 것이 일반적이다(Suh and Kim, 2012; Ku et al., 2019; Kim and Suh, 2019). 그러나 최근에는 기상 예측 및 재분석 기술의 발달로 특정 지역에 대한 정도 높은 기상장을 얻을 수 있어 이를 직접 이용하는 방법도 활발히 시도되고 있다. 최근 해양수산부(Ministry of Oceans and Fisheries, 2019)에서는 과거의 재분석 기상장을 이용하여 파랑을 추산하고, 전국 연

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

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 대학원생(Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Graduate School, Hanyang University)

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

안에 대해 일정한 격자 간격으로 재현기간과 방향별 심해설 계파를 제시한 바 있다. 이러한 정보는 항만의 외곽시설물 설계나 항내 정온도 산정에 필수 입력자료로 사용된다. 또한 항만권역의 침수피해를 방지하기 위한 재해안전항만 구축 사업에서는 안벽에서의 월파랑 산정이 요구되는 바, 폭풍해일과 이에 동반되는 파랑을 산정할 필요가 있다. 이러한 특정 해역에서의 폭풍해일과 파랑을 정도 높게 산정하기 위해서는 이들을 발생시키는 기상장(weather fields)이 필수적이며, 기상장으로부터 폭풍해일과 파랑을 산정하기 위한 수치모형의 재현성도 문제가 된다. 본 연구에서는 2018년 남동해안에 내습한 태풍 콩레이(Kong-Rey)에 대한 폭풍해일과 파랑을 수치모의하여 사용된 기상장과 해일 및 파랑 수치모형의 재현성과를 평가해보고자 한다. 이 연구의 대상으로 선정한 2018년의 태풍 콩레이는 2003년의 태풍 매미나 2016년의 태풍 차바에 비하면 그 강도나 피해 정도가 상대적으로 약하긴 하나, 정도 높은 해일 및 파랑 관측 자료가 풍부하여 기상장의 신뢰성과 수치모형의 재현성을 평가하기에 적합하다. Fig. 1은 태풍연구센터(Typhoon Research Center, www.typhoon.or.kr)에서 제공하는 태풍 콩레이의 이동경로와 풍속 25 m/s 및 15 m/s의 영향범위이다. Fig. 1에 제시된 시간은 UTC(Coordinated Universal Time)이다. 태풍 콩레이는 UTC로 2018년 9월 28일 필리핀 동부 해상에서 발생하여 북서진하여 오키나와 해상에서 북쪽으로 진로를 변경한 다음, 10월 5일 12시쯤 제주도 남쪽 해상에서 다시 북동진하기 시작하였으며, 10월 6일 남해안에 상륙하였다. 해안에 상륙한 태풍은 포항을 거쳐 동

해로 빠져 나가면서 이동속도가 점차 증가하여 남해안 상륙 후 하루 만에 동해를 관통한 다음, 일본 홋카이도 남단을 거쳐 태평양으로 들어섰다.

2. 기상장

태풍 콩레이 통과 시 폭풍해일과 파랑을 수치모의하기 위한 입력 기상장으로 일본 기상청(JMA: Japan Meteorological Agency)에서 제공하는 JMA-MSM(Japan Meteorological Agency - Meso Scale Model) 예보 기상장을 사용하였다. JMA-MSM 기상장은 서쪽으로는 중국 산둥반도, 동쪽으로는 일본 홋카이도, 남쪽으로는 대만 남쪽 해역, 북쪽으로는 만주에 이르는 일본과 한국을 포함하는 주변 해역을 대상으로 하는 지역 기상장으로 2002년 이후 2006년까지는 약 10 km 격자로 운영되다가 2006년 이후부터는 5 km 격자로 세분하여 1시간 간격의 상세한 기상장을 제공하고 있다. JMA-MSM 기상장은 해양수산부에서 2019년 제시한 전국 심해설계과 산출을 위한 태풍 시의 파랑 추산에도 사용되어 그 타당성이 확보된 바 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2019). 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 초기에는 태풍 파라미터가 단순하여 이동속도를 고려하기 전의 회전장(vortex field)이 태풍 중심에 대해 대칭을 이루었으나, 최근에는 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(Suh and Kim, 2012). Table 1은 태풍 콩레이에 대한 JTWC-BT 정보이다. 실제로는 이전 기간에 대한 정보도 제공하고 있으나 우리나라에 영향을 미치기 시작하는 10월 4일 이후의 정보만 수록하였다. 본 연구의 폭풍해일 수치모의와 파랑 수치모의에 사용되는 JTWC-BT 바람장은 폭풍해일 수치모형인 ADCIRC(ADvanced CIRCulation model)의 option에서 NWS를 8로 선택하고 Table 1의 정보를 입력하여 폭풍해일 수치모의를 수행한 다음, ADCIRC에서 생성해준 바람장 파일을 파랑 수치모형인 unSWAN(unstructured grid version of the SWAN wave model)에 공급하여 파랑을 수치모의하였다. Suh and Kim(2012)에서 사용한 비대칭 바람장을 얻기 위해서는 ADCIRC에서 제공하는 보조 프로그램인 ASWIP.F에 Table 1의 best track 정보를 넣어 추가적인 트랙 정보를 얻고, 이 추가 정보를 ADCIRC에 option NWS=19를 선택하여 입력해야 하며, 같은 방법으로 unSWAN과 바람장을 공유할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 비대칭 바람장을 시도하지 않고, 기본적인 JTWC-BT 바람장에 대해서만 연구를 수행하였으며, 비대칭 바람장 사용에 대해서는 향후 과제로 남

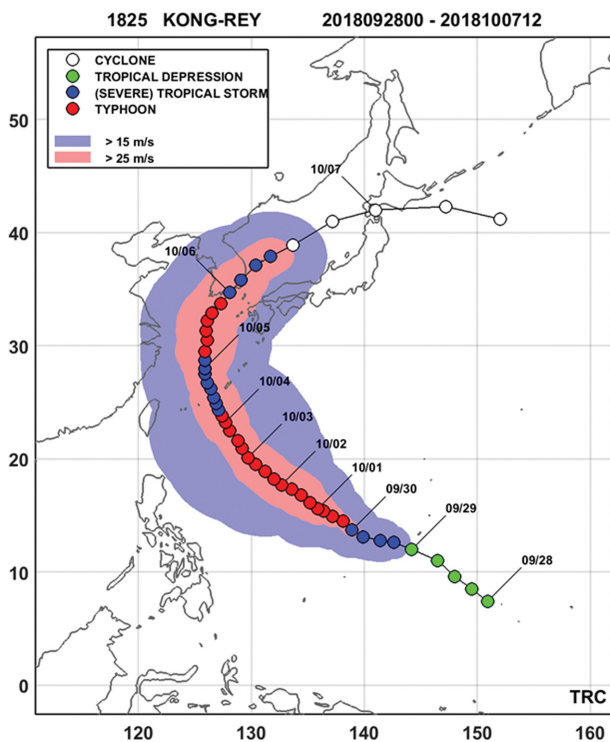


Fig. 1. Track of Typhoon Kong-Rey of 2018 (Captured from Typhoon Research Center, www.typhoon.or.kr).

Table 1. Best track information provided by JTWC for Typhoon Kong-Rey of 2018

Time (UTC)	Lat. (N°)	Long. (E°)	Max. wind speed (knot)	Central pressure (hPa)	Wind intensity for the radii (knots)	1st quadrant (km)	2nd quadrant (km)	3rd quadrant (km)	4th quadrant (km)	Pressure of the last closed isobar (hPa)	Radius of the last closed isobar (km)
2018100400	23.2	127.6	70	977	34	398.2	388.9	342.6	435.2	1010	583.4
2018100400	23.2	127.6	70	977	50	250.0	240.8	148.2	175.9	1010	583.4
2018100400	23.2	127.6	70	977	64	111.1	101.9	74.1	83.3	1010	583.4
2018100406	24.4	127.1	65	973	34	407.4	416.7	342.6	444.5	1004	426.0
2018100406	24.4	127.1	65	973	50	222.2	185.2	166.7	203.7	1004	426.0
2018100406	24.4	127.1	65	973	64	111.1	101.9	74.1	83.3	1004	426.0
2018100412	25.5	126.6	65	974	34	407.4	426.0	351.9	463.0	1007	444.5
2018100412	25.5	126.6	65	974	50	194.5	175.9	83.3	129.6	1007	444.5
2018100418	26.8	126.1	65	976	34	388.9	407.4	388.9	472.3	1009	592.6
2018100418	26.8	126.1	65	976	50	185.2	157.4	111.1	148.2	1009	592.6
2018100500	27.9	125.7	60	978	34	398.2	426.0	416.7	481.5	1009	444.5
2018100500	27.9	125.7	60	978	50	194.5	203.7	166.7	222.2	1009	444.5
2018100506	29.4	125.8	60	979	34	398.2	388.9	370.4	435.2	1009	435.2
2018100506	29.4	125.8	60	979	50	203.7	157.4	148.2	175.9	1009	435.2
2018100512	31.4	125.8	65	975	34	500.0	500.0	407.4	416.7	1010	481.5
2018100512	31.4	125.8	65	975	50	231.5	213.0	157.4	138.9	1010	481.5
2018100518	32.8	126.7	65	976	34	453.7	435.2	388.9	305.6	1010	463.0
2018100518	32.8	126.7	65	976	50	259.3	222.2	120.4	166.7	1010	463.0
2018100600	35.0	128.6	60	979	34	453.7	453.7	426.0	231.5	1010	648.2
2018100600	35.0	128.6	60	979	50	175.9	175.9	166.7	120.4	1010	648.2
2018100606	37.1	130.4	55	983	34	435.2	444.5	388.9	231.5	1010	648.2
2018100606	37.1	130.4	55	983	50	185.2	203.7	157.4	92.6	1010	648.2
2018100612	38.7	133.4	50	984	34	426.0	416.7	351.9	194.5	1008	611.2
2018100612	38.7	133.4	50	984	50	166.7	175.9	157.4	74.1	1008	611.2
2018100618	40.7	136.9	45	986	34	426.0	370.4	351.9	194.5	1007	518.6
2018100700	42.0	140.4	45	987	34	277.8	435.2	305.6	213.0	1008	509.3

겨둔다.

Fig. 2는 태풍 콩레이가 남해안에 상륙하기 전인 2018년 10월 6일 00:00시(UTC)의 기압장과 바람장을 JMA-MSM과 JTWC-BT로부터 구하여 비교한 것으로, 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 이외의 배경장에서의 기상 변화도 두드러진다. JTWC-BT에 의한 바람장은 태풍 영향 구역 내에만 존재하며, 최강 풍속도 JMA-MSM에 비해 약하다.

3. 수치모의

본 연구에서 폭풍해일을 수치모의하기 위한 수치모형으로 Luetlich et al.(1992, 1994)에 의해 개발되어 국내에도 널리 보급된 ADCIRC ver.53.04를 선정하였다. ADCIRC는 파동 방정식 형태의 연속방정식을 채택한 천수방정식을 지배방정식으로 하는 유한요소모형으로 기압과 바람 변화에 의한 폭풍해일을 해석할 수 있으며, 유한요소망 생성 및 결과 분석을 위한 유용한 도구들이 제공되어 편리하다. 한편 파랑 재

현을 위한 수치모형으로는 Delft University에서 개발하고 수 많은 현장에 적용되어 검증이 된 유한요소모형인 unSWAN ver.41.10을 이용하였다. 이 수치모형들의 자세한 지배방정식과 수치기법에 대해서는 세계적으로 잘 정립되어 있으므로 생략하고, 본 연구에서 사용된 ADCIRC와 unSWAN의 과거 version과의 가장 큰 차이만을 소개하면 Fig. 3에 보인 바와 같이 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; Wang et al., 2019). 이러한 경향은 다른 파랑 수치모형인 WW3(Wave Watch 3)에서도 최근의 연구 결과를 반영하여 현재의 SWAN과 유사한 C_d 를 사용하고 있다(Qiao 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.

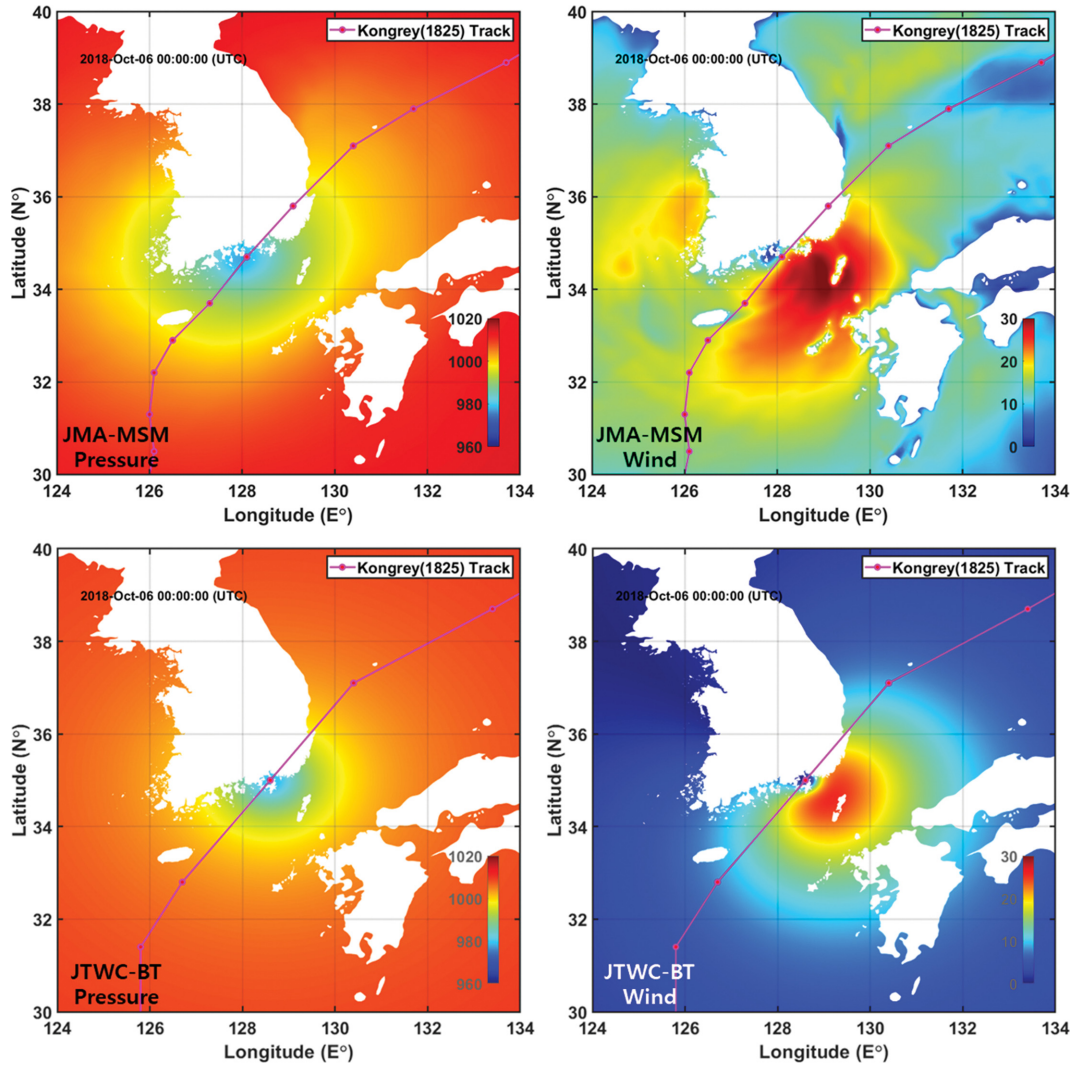


Fig. 2. Comparison of pressure and wind fields for Typhoon Kong-Rey at 0:00 of 6 Oct. 2018 (UTC): JMA-MSM (upper panels), JTWC best track (lower panels).

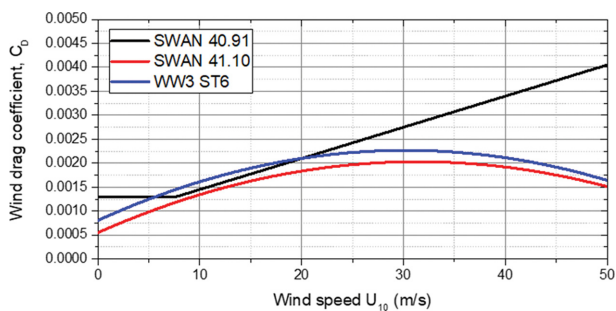


Fig. 3. Comparison of drag coefficients employed in various numerical wave models.

Fig. 4는 폭풍해일과 파랑을 수치모의하기 위한 유한요소 망을 보여준다. 총 173,202개의 요소와 총 93,486개의 절점을 사용하였다.

Fig. 5는 수치모의의 결과와 관측치를 비교하는 정점의 위치를 보여주는 바, 폭풍해일에 대해서는 태풍의 이동경로 주변의 강풍 영역에 위치하는 10개 항에서 관측된 조위 관측 기

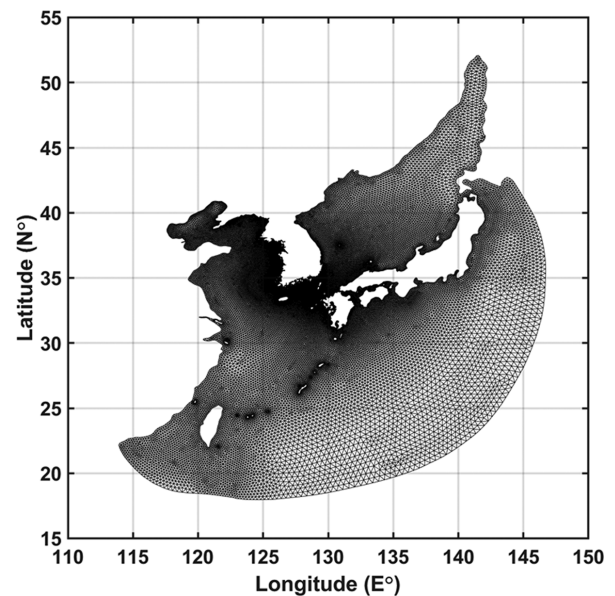


Fig. 4. Finite element mesh for simulation of Typhoon Kong-Rey of 2018.

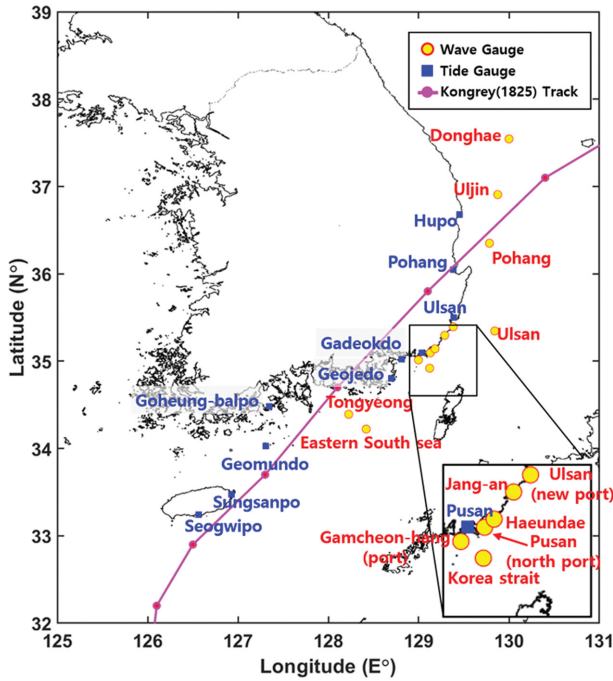


Fig. 5. Location of comparison between measured and calculated storm surge and significant wave.

록으로부터 예상조위를 제거한 순수 폭풍해일 시계열과 수치모의 결과를 비교하였으며, 파랑에 대해서는 국립해양조사원의 3개 파고부이 관측점(통영, 남해동부, 대한해협), 기상청의

4개 외해 파고부이 관측점(울산, 포항, 울진, 동해)과 2개 연안 파고부이 관측점(부산 북항, 장안), 그리고 한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science and Technology, 2019)에서 운영하는 전국파랑관측자료 제공시스템(WINK: Wave Information Network of Korea)의 3개 AWAC 파고계 관측점(감천항, 해운대, 울산 신항)에서 관측된 유의파고를 수치모의 결과와 비교하였다.

4. 결과 및 분석

Fig. 6은 남해 중부 해안에 위치하는 성산포, 서귀포, 거문도 및 고흥발포항에서 태풍 콩레이 내습 시 관측된 폭풍해일고의 시계열과 JMA-MSM 기상장 및 JTWC best track 정보를 이용하여 구한 기상장을 사용하여 ADCIRC 수치모형에 의해 계산된 폭풍해일고 시계열을 비교한 것이다. 그림에 보인 바와 같이 JTWC 기상장은 태풍 영향권 외부의 배경장이 무시되어 태풍 통과 1일 전후 기간에만 폭풍해일이 나타나며, 전반적으로 폭풍해일이 과소평가되었다. 반면에 JMA-MSM 기상장을 사용하면 태풍 영향 기간 이전부터 태풍이 통과한 이후의 전 기간에 대해 관측치와 매우 잘 일치하는 결과를 보인다. 폭풍해일은 기압과 바람이 모두 영향을 미치므로 폭풍해일 수치모의의 정밀도는 사용하는 기상장의 신뢰도에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다.

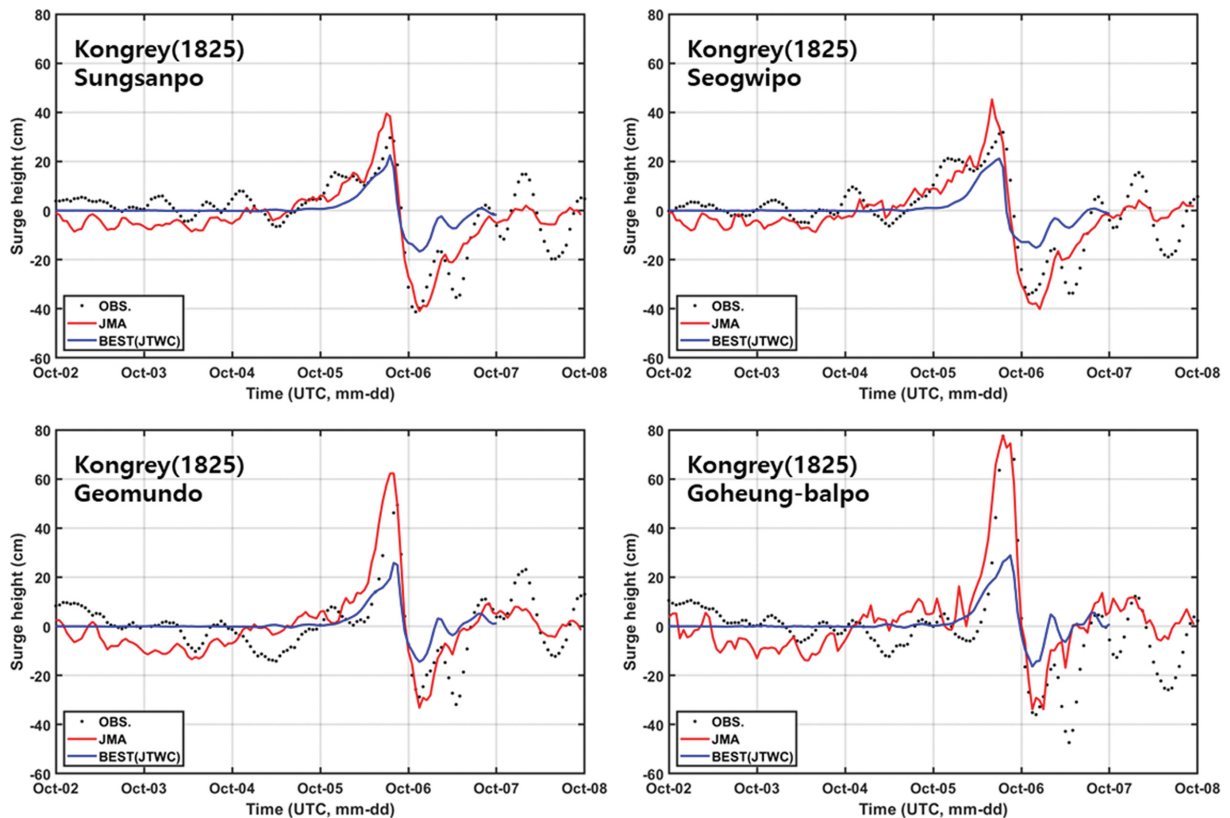


Fig. 6. Comparison of storm surge heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at harbors along central-south coast for Typhoon Kongrey.

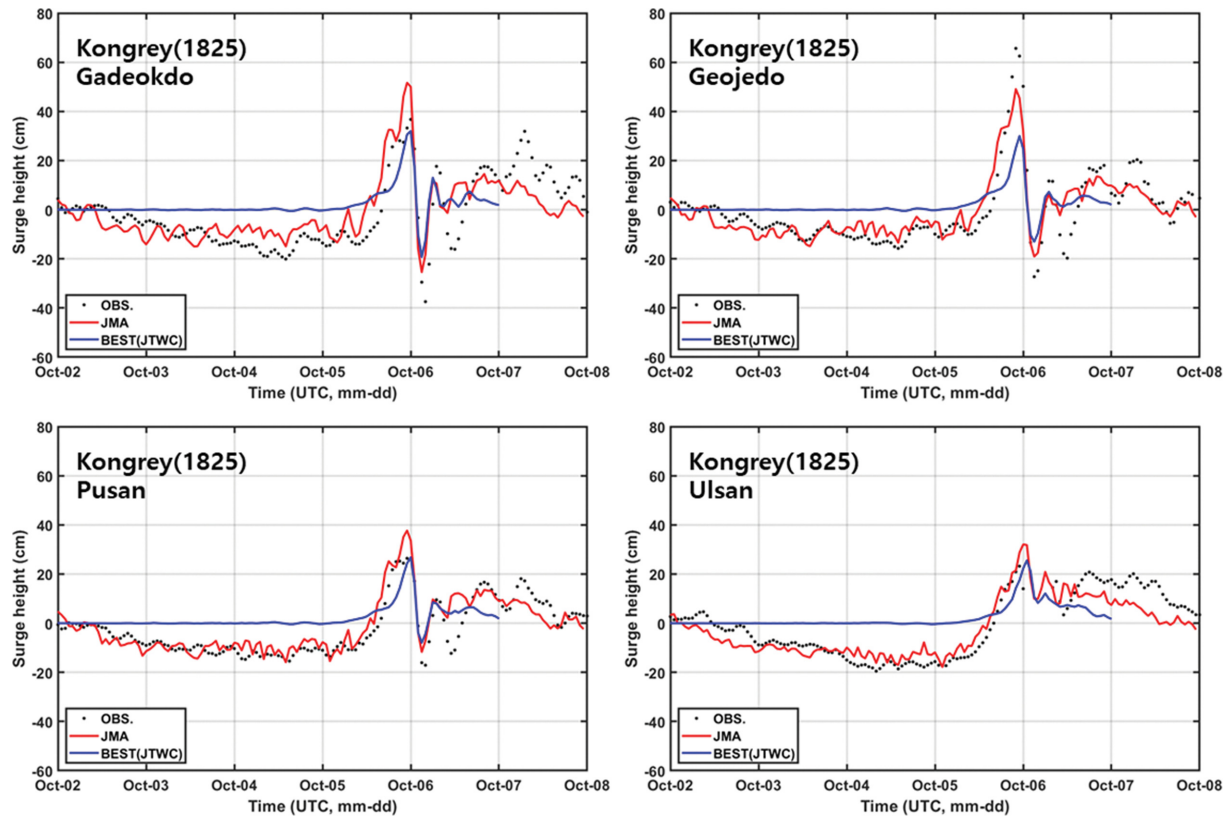


Fig. 7. Comparison of storm surge heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at harbors along eastern-south coast for Typhoon Kong-Rey.

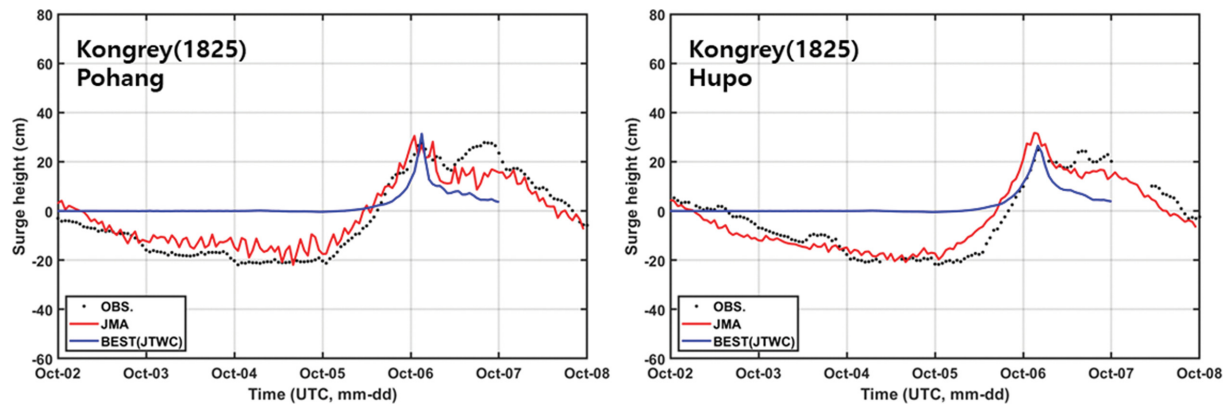


Fig. 8. Comparison of storm surge heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at harbors along east coast for Typhoon Kong-Rey.

Fig. 7은 동남 해안에 위치하는 가덕도, 거제도, 부산 및 울산항에서의 폭풍해일고를 비교한 것으로 JMA-MSM 기상장 사용 시 태풍 통과 전 3일간의 해수위 하강이 잘 나타난 반면, JTWC-BT 기상장을 사용한 경우 태풍 영향권 외부의 선행하는 고기압을 고려하지 못해 이러한 현상을 재현하지 못하고 있다. 그림에 보인 바와 같이 배경 기압장에 의한 태풍 도달 전 해수위 하강 현상은 동해 쪽으로 갈수록 강하게 나타나는 바, 가장 동쪽에 위치하는 울산항에서의 폭풍해일고 시계열을 살펴보면 태풍 도달 전 20 cm 정도의 해수위 하강이 먼저 나타난 다음, 태풍에 의한 수위상승이 20 cm 정도 발

생하여, 총 해일고는 40 cm에 달한다.

Fig. 8은 동해안의 포항과 후포항에서의 폭풍해일고를 관측치와 비교한 것으로서, 전술한 선행 고기압에 의한 해수위 하강이 공통적으로 나타나며, 특히 태풍 통과 후 높은 해일고가 하루 이상 지속되는 특이한 현상이 나타난다. 이 현상은 강릉-울진-후포-포항으로 이어지는 동해안에서 수심이 200 m 이내의 대륙붕이 넓게 분포하여 태풍 경로의 북측 해역에서 해안 쪽으로 부는 태풍에 의한 강풍에 의해 발생한 폭풍해일고가 대륙붕 상에서 포획되어 오랫동안 지속되는 대륙붕 상 파의 공진현상 때문으로 추측된다.

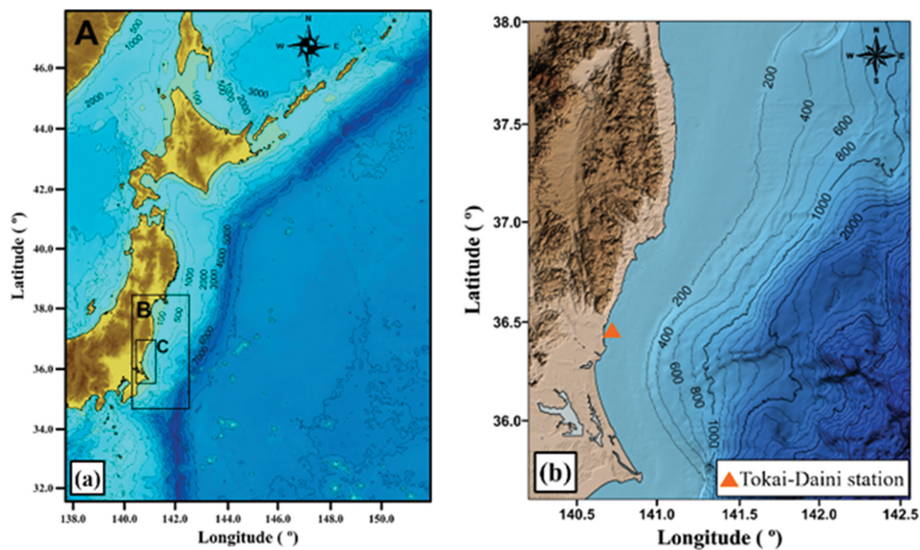


Fig. 9. (a) Computational domain to simulate the 2011 East Japan Tsunami, (b) Bathymetry in the neighborhood of Ibaraki bay area (Kim et al., 2016).

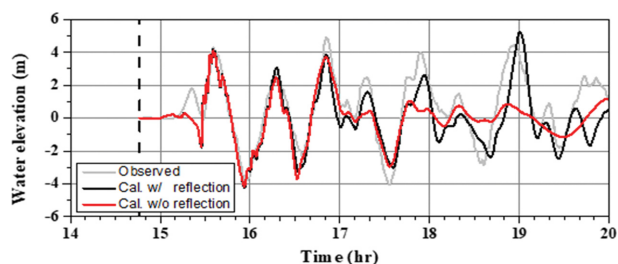


Fig. 10. Water elevations calculated with and without reflection compared with the observed one at Tokai-Daini wave station for tsunami of 11 March 2011 (Kim et al., 2016).

이러한 현상은 2011년 동일본 대지진에 의해 발생한 지진 해일이 Fig. 9에 제시한 바와 같이 Tokai 제2원전이 위치하는 일본의 Ibaraki 해안에 내습했을 때 Fig. 10에 보인 바와 같이 주기 30분의 지진해일파가 해안선에서 반사되고, 반사된 파가 수심 200 m의 대륙붕 선단에서 재반사되는 과정을 반복하며 공진을 일으켜 오랜 시간 동안 지속되는 현상이 나타남을 Kim et al.(2016)이 밝힌 바 있다. Fig. 10에서 보인 바와 같이 해안선에서의 반사를 무시한 경우에는 처음 3개 파가 도달한 이후 점차 소멸되어 가는 현상을 볼 수 있다. 이

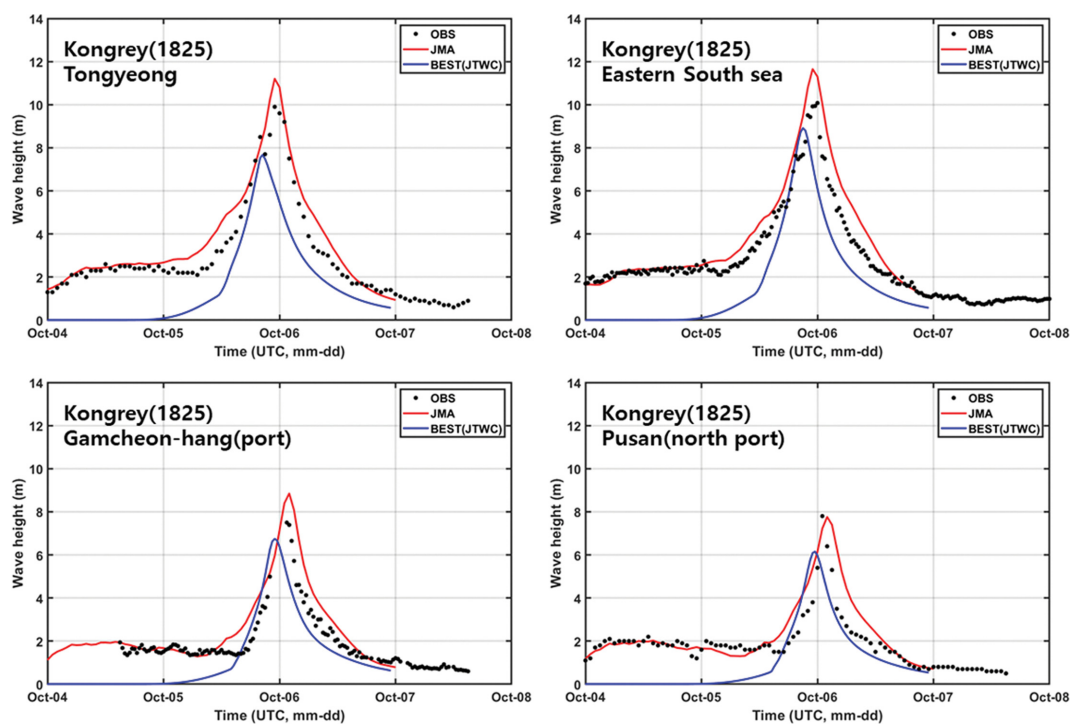


Fig. 11. Comparison of significant wave heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at buoys on central-south sea for Typhoon Kongrey.

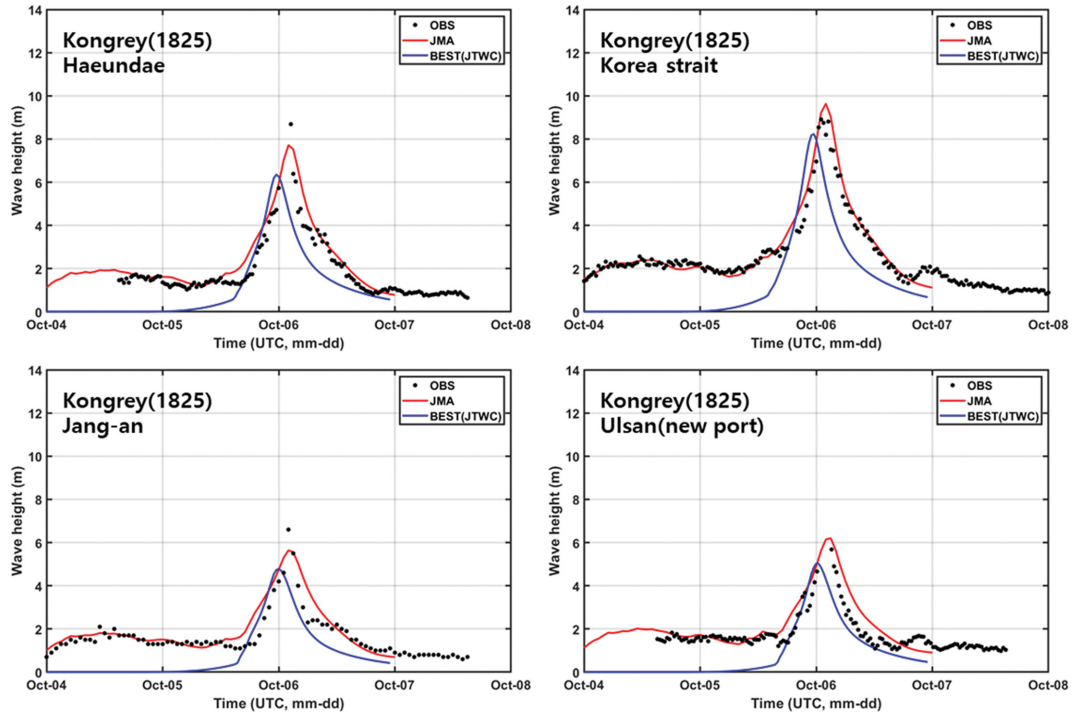


Fig. 12. Comparison of significant wave heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at buoys on eastern-south sea for Typhoon Kong-Rey.

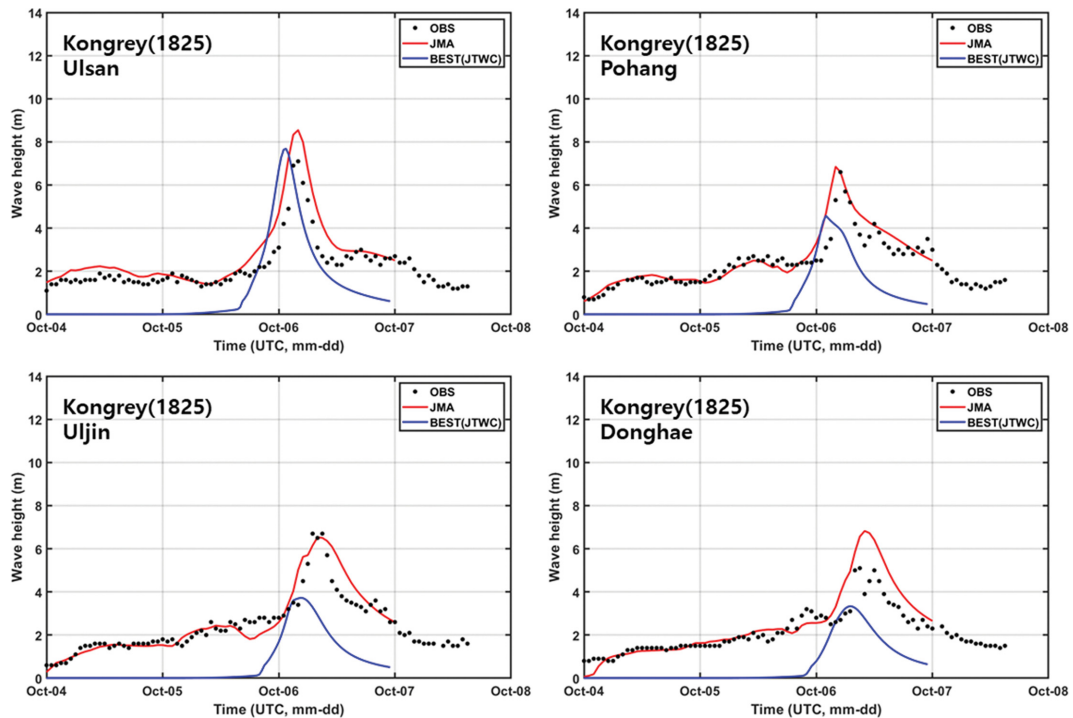


Fig. 13. Comparison of significant wave heights calculated using JMA-MSM and JTWC best track against observed data at buoys on east sea for Typhoon Kong-Rey.

리한 현상은 폭풍해일 발생 시 대륙붕이 존재하는 동해안에 서만 나타나는 특이한 현상으로 상세한 기전을 밝히기 위한 추가 연구가 필요하다.

Fig. 11은 남해 중부 해역에 위치하는 통영 파고 부이, 남해동부 파고 부이, 감천항 전면 해역의 AWAC 및 부산 남향

파고 부이 관측점에서 태풍 콩레이 내습 시 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. 그림에 보인 바와 같이 JMA-MSM 바람장을 이용한 경우 태풍 내습 전부터 통과 후까지 전 기간에 걸쳐 파고가 잘 재현되었음을 알 수 있다. 그러나 JTWC-BT 바람장을 이용한 경우 태풍

영향권 외곽의 배경장을 고려할 수 없어 계산된 파고가 과소 평가되었다.

Fig. 12는 남해 동부 해역에 위치하는 대한해협 파고 부이, 장안 파고 부이, 해운대 및 울산신항 전면 해역의 AWAC 관측점에서 태풍 콩레이 내습 시 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. 해안선에 가까운 천해역인 해운대와 장안 관측점의 경우 침두 파고가 약간 작게 평가되는 경향이 있으나 JMA-MSM 바람장을 사용한 경우 전반적인 파고 재현이 만족스럽게 이루어졌다. 반면에 JTWC best track 바람장을 이용한 경우에는 다른 관측점에서도 같은 이유로 계산된 파고가 과소평가되었다.

Fig. 13은 동해상에 위치하는 울산, 포항, 울진 및 동해 파고 부이 관측점에서 태풍 콩레이 내습 시 관측된 파랑의 유의파고와 수치모의에 의한 파고를 비교한 것이다. JMA-MSM 바람장을 사용한 경우 전반적으로 계산된 파고가 관측치와 잘 일치하고 있다. 그러나 JTWC-BT 바람장을 이용한 경우에는 계산된 파고가 과소평가되었다. 특히 태풍 이동 경로의 북쪽에 위치하는 울진과 동해 파고 부이의 경우 JTWC-BT 바람장이 급격히 약화되어 파고의 과소평가 정도가 심해진다. 이는 best track의 간단한 태풍 파라미터 몇 가지만으로 복잡한 바람장을 표현하는 데 한계가 있기 때문으로 판단된다. Fig. 14는 태풍 콩레이가 동해상으로 빠져나간 10월 6일 07:00시(UTC)의 바람장을 비교한 것으로서, JMA-MSM 바람장은 태풍 이동경로 북쪽 해역 즉 가항해역에서도 북동풍의 강한 풍속이 존재하는 반면, JTWC-BT 바람장은 풍속이 매우 약한 것을 볼 수 있다. Best track에 의한 바람장 생성 시 일반적으로 바람의 회전 성분(vortex component)에 태풍의 이동속도를 더해줌으로 태풍의 이동속도가 매우 빨라지는 동해상에서는 태풍의 회전성분에 비해 이동속도가 과대하게 평가되어 비현실적인 바람장을 얻게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2018년 10월 남해안에 내습한 태풍 콩레이에 의한 폭풍해일과 파랑을 수치모의하고 관측치와의 비교를 통해 사용된 기상장(기압장과 바람장)의 신뢰도를 평가하였다. 기상장으로는 3차원 기상 수치모의에 의해 산출된 일본 기상청의 JMA-MSM 예보 기상장과 간단한 소수의 태풍 정보만으로 기상장을 생성하는 미국합동태풍정보센터의 JTWC best track 기반 기상장을 사용하였다. 폭풍해일 수치모형으로는 유한요소모형인 ADCIRC를, 파랑 수치모형으로는 역시 유한요소모형인 unSWAN을 이용하였다. 폭풍해일과 파랑 수치모의 시 바닥마찰과 기타 모든 경험 상수는 원래 ADCIRC와 unSWAN에서 제공하는 기본 값을 조정하지 않고 그대로 사용하였다. 10개 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 못하고, 태풍이 동해상으로 진출할 때 이동경로 좌측 즉 가항해역의 바람이 과소평가되는 등 한계가 있었다. 폭풍해일에 동반되는 파랑의 경우에도 3차원 JMA-MSM 기상장은 남해안에서 동해안까지 넓은 해역에 걸쳐 파고 부이 관측 자료를 잘 재현하고 있으나, JTWC best track 기반 기상장은 파랑의 시공간적 분포를 충실히 재현하지 못했다. 본 연구에서는 3차원 기상장으로 2019년 해양수산부의 심해설계와 추산 보고서에서 추천하는 일본기상청의 JMA-MSM 기상장을 사용하였으나, 그 밖에도 한국기상청(KMA, Korea Meteorological Administration), 미국국립환경예측센터(NCEP, National Centers

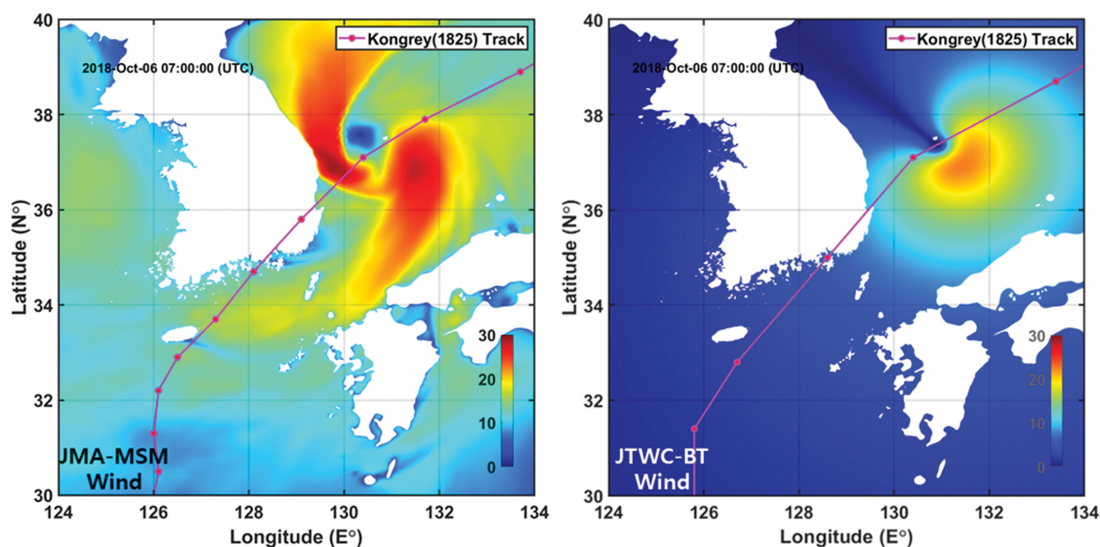


Fig. 14. Comparison of wind magnitude obtained using JMA-MSM and JTWC best track for Typhoon Kong-Rey at 07:00 of 06 Oct. 2018 (UTC).

for Environmental Prediction), 유럽중규모기상예보센터 (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 등의 다양한 자료가 존재하므로 이러한 다양한 3차원 기상장의 신뢰도를 평가하는 연구도 필요하다고 판단된다.

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.
- Kim, G.H., Jin, S.B. and Yoon, S.B. (2016). Resonance of 2011 East Japan Tsunami over Continental Shelf along Ibaraki Coast of Japan. *In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia). Journal of Coastal Research, Special Issue No. 75, pp. 1137-1141.*
- 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).
- Komen, G.J., Hasselmann, S. and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed windsea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (2019). WINK: Wave Information Network of Korea.
- 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), pp. 1-8 (in Korean).
- 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. pp. 117-149.
- 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 24 July, 2020

Revised 20 August, 2020

Accepted 20 August, 2020