

수위변화와 흐름효과를 고려한 파랑모델링 Wave Modeling considering Water Level Changes and Currents Effects

엄호식* · 강태순* · 남수용* · 정원무**
Ho-Sik Eum*, Tae-Soon Kang*, Soo-Yong Nam* and Won-Moo Jeong**

요 지 : 본 연구에서는 파랑과 흐름이 공존하는 해역에서 수위변화 및 흐름효과 고려 유무에 대하여 파랑모델을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 해수유동장은 RIAMOM 모델 결과를 적용하였으며 파랑모델은 SWAN모델을 적용하였다. 바람자료는 ECMWF, NCEP 및 JMA의 3가지에 대하여 관측자료를 비교적 잘 재현하는 JMA 자료를 적용하였다. 수치모의는 2016년 1월~8월까지 8개월간 수행하였으며, 각 경우에 대하여 관측자료와의 비교를 위하여 2.5 m 이상의 고파랑 기간에 대해 파고변화를 검토하였다. 분석결과, 수심이 깊은 파랑관측부이 정점에서는 수위/흐름효과를 고려할 경우 파고변화가 크지 않게 나타났으나, 수심이 얇은 비교 정점에서는 수위/흐름효과의 고려 여부에 따라 5~10%의 유의미한 파고변화가 나타났다.

핵심용어 : 파랑모델링, 바람자료, 수위변화 및 흐름효과, RIAMOM, SWAN

Abstract : In this study, wave model was conducted on the presence or absence of water level changes and currents effects in coastal waters coexisting with waves and currents, then the results were compared. The flow field applied the results of the RIAMOM model and the wave model applied the SWAN model. Among ECMWF, NCEP and JMA, wind data applied JMA data sets which agreed well with the observed data comparatively. Numerical simulation was conducted for 8 months from January to August 2016. For each case, the deviation of wave height was calculated for the high wave of more than 2.5 m for comparison with observed data. As a result, the deviation of wave height was not significant both considering water level changes and currents effects or not at wave observation stations installed in deep waters. However, a significant deviation of wave height of 5~10% was obtained depending on water level changes and currents effects at the comparison point in shallow waters.

Keywords : wave modeling, wind data, water level changes & currents effects, RIAMOM, SWAN

1. 서 론

파랑과 흐름이 공존하는 해역에서 파랑-흐름 상호작용에 의하여 파랑의 변형이 발생하는 것으로 알려져 있다. Kang et al.(2009)는 가로립만 입구의 협수로에서는 항시 강한 조류의 흐름이 있기 때문에 설계와 산정에 있어 파랑-해류의 상호 작용에 의한 파랑변형이 중요한 요소라고 하였으며, 그 동안 파랑과 흐름의 상호작용에 관한 많은 연구가 여러 연구자에 의해 수행된 바 있다(Perigrine, 1976). Longuet-Higgins and Stewart(1961)은 radiation stress에 의해 파랑과 흐름 간에 에너지가 쉽게 전이될 수 있음을 처음으로 제안하였다. 한편 다 방향 불규칙 파의 경우 파랑변형의 양상이 매우 복잡해서 주로 wave action 평형이론에 근거하여 흐름에 의한 에너지 스펙트럼의 변형에 대한 연구가 수행되었다(Booij, 1981; Kirby, 1984; Hedges et al., 1985). 그리고 Lee and Hur(2016)는

파랑-흐름의 상호작용에 의한 파랑변형 매커니즘 분석에서 파랑과 흐름이 역방향으로 만날 경우 유속의 난류성분이 증가하여 난류강도가 커지고, 이로 인하여 파랑과 흐름이 만나는 지점에서는 파고가 증가하나 파랑이 전파할수록 파랑에너지가 감소하여 파고가 줄어든다는 것을 수치수조를 이용하여 확인한 바 있다.

본 연구에서는 SWAN(Simulating Waves Nearshore)모델을 이용하여 우리나라 서해/남해 및 동해 전체 영역에서 수위변화와 흐름효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 수치모의하고 그 차이를 분석하였다. 또한, 파랑모델 입력을 위한 바람자료 선정을 위하여 ECMWF(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), NCEP(National Centers Environmental Prediction) 및 JMA(Japan Meteorological Agency)의 3개 기관에서 제공하는 바람자료를 적용하여 관측자료와 비교·검토하였으며, 가장 높은 정확도를 보이는 JMA 자료를

*(주)지오시스템리서치(Corresponding author: Tae-Soon Kang, GeoSystem Research Corp., 172 LS-ro, Gunpo, Gyeonggi, 15807, Korea, Tel: +82-70-7019-0610, Fax: +82-70-7016-0673, kangts@geosr.com)

**한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Coastal and Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

적용하여 수위변화와 흐름효과를 고려한 모델링을 수행하였다. 검증은 기상청 파랑관측부이(덕적도, 외연도, 칠발도, 추자도, 거제도, 거문도, 마라도, 포항, 울릉도, 동해) 자료를 활용하였다. SWAN 모델에 입력한 해수유동장(수위, 흐름) 정보는 일본 큐슈대학의 RIAMOM(Research Institute for Applied Mechanics Ocean Model) 모델 1시간 간격 결과를 적용하였다. 모의기간은 2016년 1월~8월의 8개월간 수행하였으며, 1시간 간격의 파랑 시계열 자료를 추출하여 분석하였다. 파랑-흐름상호 작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 고파랑(2.5 m 이상) 발생기간에 대하여 파고변화를 산정하였으며, 수심이 얇은 비교정점을 선정하여 파고변화를 검토하였다.

2. 모델 구축

2.1 파랑모델

본 연구에서 적용한 수치모델은 네덜란드 Deltares에서 개발한 SWAN 모델(Booij et al., 1999)로 파랑에너지의 천수(shoaling), 굴절(refraction), 회절(diffraction), 흐름, 바람에 의한 에너지 생성, 백파(white capping), 쇄파(wave breaking) 등에 의한 에너지감쇠, 파랑간의 4차 비선형현상, 바닥마찰 등을 모의할 수 있어 주어진 바람과 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수 및 하구 등에서의 파랑계산이 가능하다. 이 모델의 기본방정식은 파동의 작용 평형방정식(wave action balance equation)이며, 사용되는 파랑에너지의 원천항(source term)에 따라 제1세대, 제2세대, 및 제3세대 모델로 분류된다. SWAN 모형의 지배방정식은 다음과 같은 파작용 평형방정

식을 사용한다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

위 식에서 $N = S(f, \theta)/\sigma$ 는 파작용 밀도이고, $S(f, \theta)$ 는 방향스펙트럼밀도이다. $\sigma = w - \vec{k} \cdot \vec{U}$ 는 흐름의 속도 \vec{U} 로 움직이는 좌표에서의 각주파수이고, $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ 는 각각 x, y, σ, θ 에서의 위상속도이다. 평형방정식의 우변 S 는 파랑의 생성, 감소 및 비선형 상호작용 등에 의한 파에너지 밀도(wave energy density)를 나타내는 항을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

여기서, S_{in}, S_{ds}, S_{nl} 은 각각 바람에 의한 에너지 유입, 백파와 저면마찰 및 쇄파 등에 의한 에너지 소산과 성분파간의 비선형 상호작용을 나타낸다. 본 연구에서 활용한 SWAN 모델에 대한 상세 정보는 매뉴얼(The SWAN team, 2008)을 참고하기 바란다.

파랑모델 계산영역은 서해, 남해 및 동해 전역을 포함한 영역으로 경도 및 위도 방향으로 각각 $117^\circ\text{E} \sim 147^\circ\text{E}$, $20^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 으로 격자크기는 $1/60^\circ$ (약 2 km)이며, 격자수는 $1,800 \times 1,800$ 로 구축하였다(Fig. 1). 해안선 및 수심은 국립해양조사원에서 발행하는 최신수치해도 자료를 사용하였으며, 해도상의 수심을 보간하여 각 격자점의 수심을 추출하였다. 주파수는 $0.04 \sim 0.4$ Hz 구간에서 25개로 구성하였으며, 방향분할은 10° 간격으로 36개로 분할하였다. 모델구축에 대한 상세한 설명은 Table 1에 제시하였다.

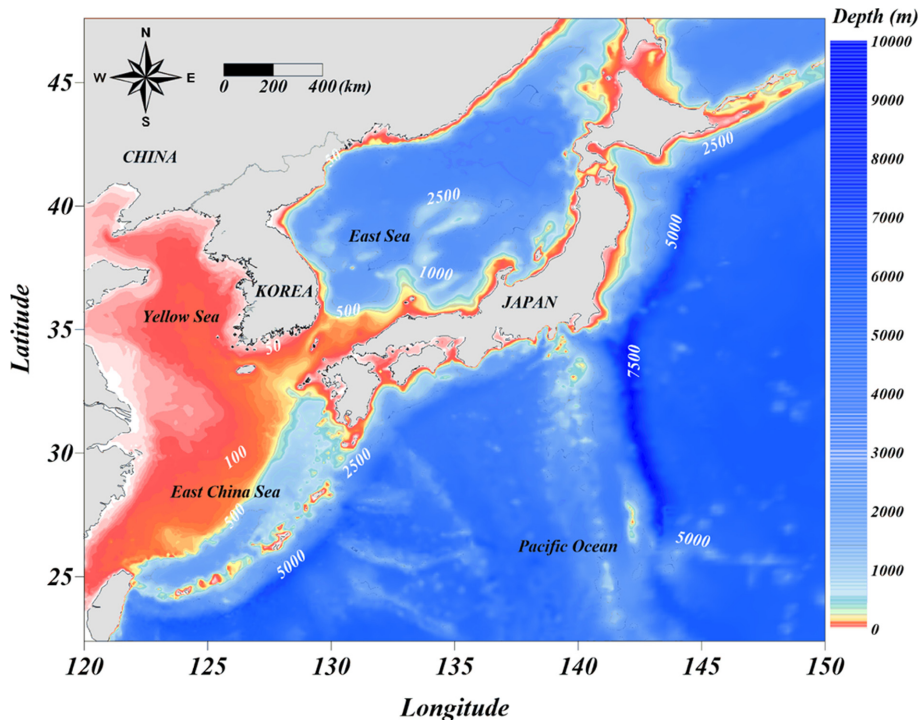
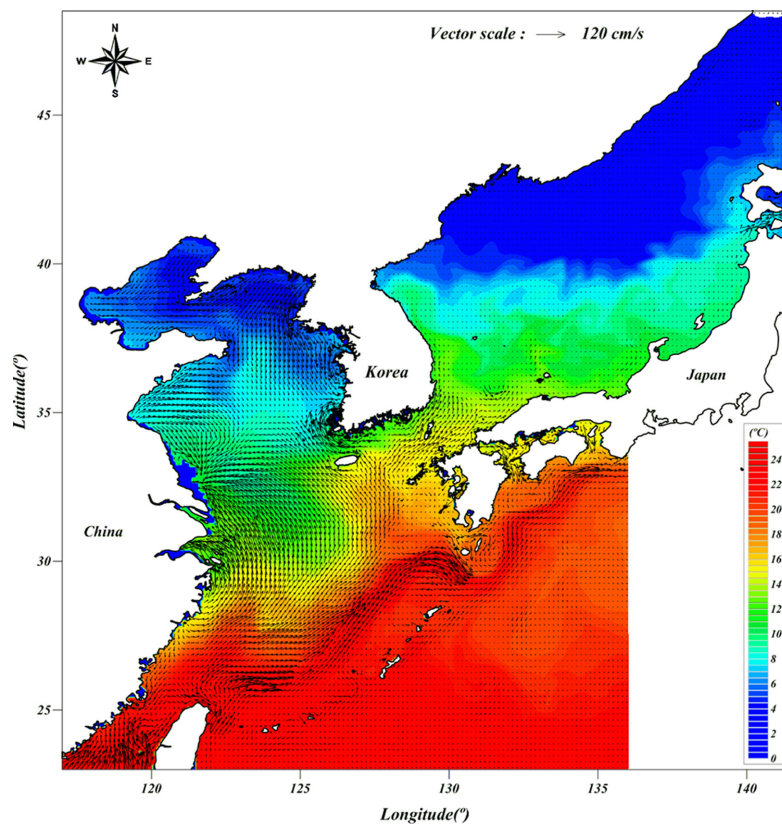


Fig. 1. Model domain and bottom topography.

Table 1. Description of wave numerical modeling.

Category	Contents
Model	SWAN V40.85 (Delft University of Technology)
Wind data	2016.1~8 : 3hr interval data of JMA Resolution : $0.0625^\circ \times 0.050^\circ$
Verification data	Marine weather observation buoys (KMA)
Grid	Orthogonal grid system
Domain	Lon. $117^\circ \sim 140^\circ$, Lat. $20^\circ \sim 50^\circ$, $1/60^\circ$ interval ($1,800 \times 1,800$)
Initial condition	36 components(10° interval) of wave direction 25 components($0.04 \sim 0.4$ Hz) of frequency
Depth data	Digital charts(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency)
Water level & Currents	Real-time data (RIAMOM result)

**Fig. 2.** RIAMOM model domain.

2.2 해수유동모델

본 연구에서 적용한 해수유동장(수위, 흐름)은 큐슈대학교에서 개발한 RIAMOM 결과를 활용하였으며, RIAMOM 모델은 Yoon(1982a, 1982b, 1982c, 1982d)에 의해서 개발된 모델이며, 이후 Hirose et al.(1996), Hirose(2011) 및 Hirose et al.(2013) 등이 영역을 동북아시아 지역으로 확장하여 현재 실시간 예측자료 생산을 목적으로 운영 중이다. RIAMOM 모델은 실시간으로 해수유동 정보를 1시간 간격으로 제공하고 있으며, Fig. 2에 모델영역 및 해수유동장 결과를 제시하였다. 모델에 대한 자세한 내용은 RIAMOM 홈페이지(<http://dreams-i.riam.kyushu-u.ac.jp/vwp/>)를 참고하기 바란다.

3. 입력바람자료

본 연구에서는 파랑모델의 입력바람장 선정을 위하여 가용한 3개의 바람자료(ECMWF, NCEP, JMA)를 적용하여 정확도를 비교·평가하였다. 각 기관에서 제공하는 바람자료는 실시간 예측자료로서 공간적, 시간적 해상도가 상이하다. ECMWF는 2012년부터 현재까지 0.125° , 6시간 간격의 바람자료를 제공하고 있으며, NCEP에서는 2011년부터 0.2° , 1시간 간격의 자료를 제공하고 있다. JMA에서는 2012년부터 $0.06^\circ \times 0.05^\circ$, 3시간(재분석장은 1시간 간격)의 예측자료를 제공하고 있다. 각 기관별 바람자료에 대한 내용은 Table 2에

제시하였다.

바람자료의 정확도 평가를 위하여 서해에서 고파랑 발생기간인 2013년 11월, 2014년 11월 및 2015년 2월의 3개 이벤트를 대상으로 각 기관(ECMWF, NCEP, JMA)별 바람자료를 적용하여 관측자료와 비교하였다. 계산결과, 3개 기관의 바람자료가 관측자료(파고, 주기)와 유사한 경향성을 보이지만

JMA 결과가 고파랑시의 재현정도에서 우수한 것으로 나타났다(Fig. 3). 특히 2014년 11월 이벤트(최대유의파고 6 m)에서 기상청 외연도/칠발도 부이 관측자료와의 비교결과 ECMWF, NCEP 결과는 약 1.5~2.0 m의 차이를 보이는 반면에 JMA 결과는 0.5 m 이내의 오차를 보이고 있으며, 전체적으로 JMA 바람자료를 적용한 경우가 더 높은 재현성을 보이는 것으로

Table 2. Summary on wind data sets.

Wind data	Spatial resolution (degree)	Period	Time resolution (hr)	Area
ECMWF	Set A	1979.01 ~ 1993.12	6 hr (Forecasting data)	Global
	Set B	1994.04 ~ 2006. 02		
	Set C	2006.03 ~ 2012. 01		
	Set D	2012.02 ~ current		
NCEP	Set A	1979.01 ~ 2010.12	1hr (Forecasting data)	Global
	Set B	2011.01 ~ current		
JMA	Set A	2006.03 ~ current	3hr (Forecasting data)	120~150E 22.4~47.6N
	Set B	2012.01 ~ current	1hr (Reanalysis data)	

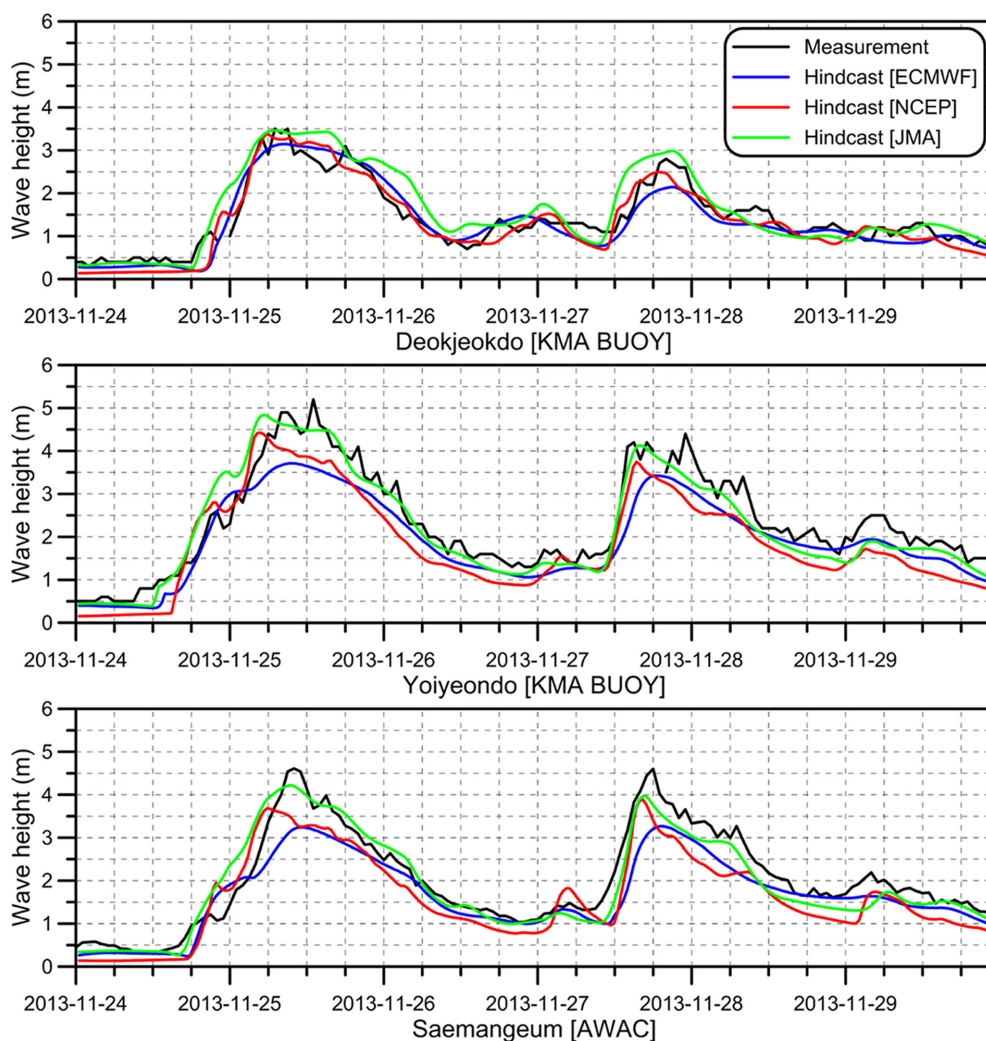


Fig. 3. Comparison of modeling results and observed data using 3-wind(ECMWF, NCEP, JMA).

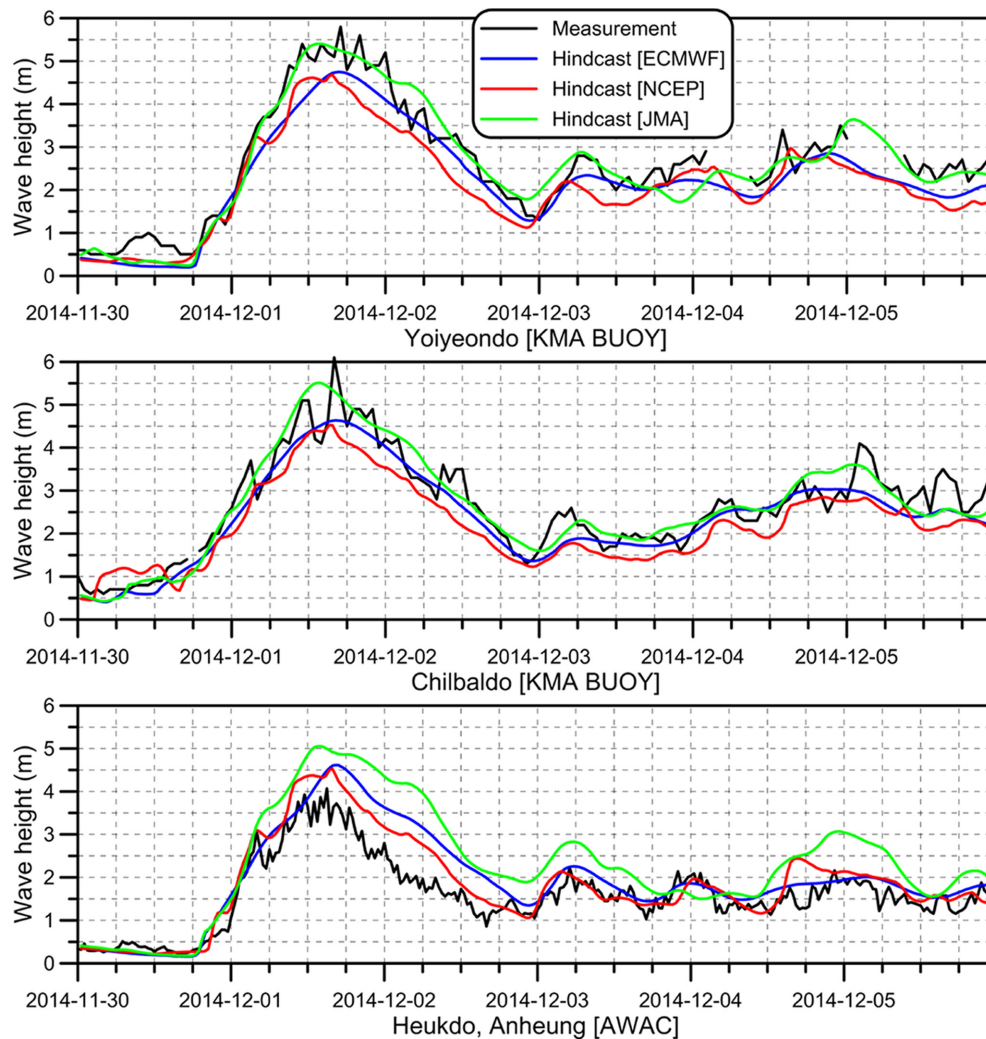


Fig. 3. Comparison of modeling results and observed data using 3-wind(ECMWF, NCEP, JMA) (continued).

나타났다. 이상의 결과를 토대로 본 연구에서는 파랑-흐름 상호작용에 따른 효과를 검토하는데 JMA 바람자료를 활용하였다.

4. 수위변화 및 흐름효과에 대한 영향 검토

2016년 1월~8월의 8개월간 JMA 3시간 간격의 바람자료를 활용하여 수위변화 및 흐름효과를 고려하지 않은 파랑추산 결과와 10개소의 기상청 해양기상부이 관측자료(Table 3, Fig. 4)를 비교하여 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 서/남/동해 전 해역에서 관측자료와 경향성이 매우 비슷한 것으로 나타났으며, 일부 고파랑 발생시기에는 모델값이 다소 과소 산정하는 것으로 나타났다. 이는 JMA가 가지는 바람자료의 시간적 해상도(3시간 간격)의 한계로 판단된다.

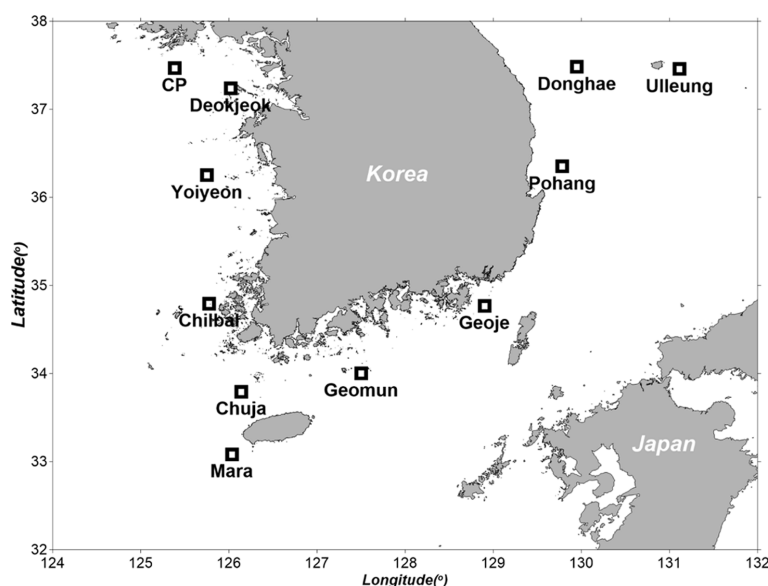
2016년 1월에 대하여 수위변화와 흐름효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하여 Fig. 6에 제시하였다. 그림에는 각 경우의 파고 시계열과 수위 및 유속 시계열을 함께 도시하였다. 2016년 1월 19일~20일의 2일간 서해안에서 약

3 m의 고파랑이 지속적으로 내습하였다. 이 기간 중에 덕적도, 거문도에서는 흐름효과를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우와 비교하여 고파랑 시기에 일부구간에 대해서 파고가 높게 나타났으며, 칠발도에서는 오히려 파고값이 작아지는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 2일간 지속적으로 발생하여 서해안에서의 흐름특성(1일 2회 창/낙조류)을 고려했을 경우 흐름방향에 따른 차이는 아닌 것으로 판단된다. 또한 남해안 및 동해안에서는 파고차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 남해안과 동해안 비교 정점들의 수심은 80~2,200 m로 서해안 정점들과 비교하여 상대적으로 깊은 수심을 보이고 있어 수심변화에 따른 파고변화가 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

이상의 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 모델링 전 기간(2016년 1~8월)에 대하여 관측값과의 RMSE값을 산정하였으며, 두 경우 거의 유사한 RMSE 값(6.8, 6.9 cm)을 보였다. 이는 파고가 낮은 시기를 포함하여 RMSE를 산정하였기 때문에 상대적으로 높은 정확도를 보이는 것으로 보이지만 고파랑의 재현성 관점에서는 바람직한 비교 방법은 아닌 것으

Table 3. Basic information of wave buoy stations.

Station	Location		Water depth (m)
	Lat.	Lon.	
Deokjeok	37°14'10"N	126°01'08"E	30
Yoiyeon	36°15'00"N	125°45'00"E	47
Chilbal	34°47'36"N	125°46'37"E	33
Chuja	33°47'37"N	126°08'28"E	85
Mara	33°05'00"N	126°02'00"E	130
Geomun	34°00'05"N	127°30'05"E	80
Geoje	34°46'00"N	128°54'00"E	87
Pohang	36°21'00"N	129°47'00"E	310
Donghae	37°28'50"N	129°57'00"E	1,518
Ulleung	37°27'20"N	131°06'52"E	2,200
CP (Comparison point)	37°28'01"N	125°23'00"E	15

**Fig. 4.** Location map of wave buoy stations and comparison point.

로 사료된다. 따라서 모델 전 기간을 대상으로 하지 않고 8개월간의 자료 중에서 2.5 m 이상의 고파랑 발생시기만을 대상으로 RMSE를 재산정하였다. 2.5 m 이상의 고파랑 시기에 대한 RMSE값은 수위/흐름효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우가 각각 38.6 cm, 40.3 cm로 나타나 수위/흐름효과를 고려한 경우가 정확도 측면에서 다소 향상되는 것으로 나타났다. 하지만 그 정도는 크게 유의미한 값을 가지지 않는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 파랑관측부이가 설치되어 있는 비교점의 수심이 30~2,200 m 정도로 깊기 때문으로 사료된다.

본 연구에서는 수위변화와 흐름효과를 고려하여 파랑후측 모델링의 정확도를 개선하고 그 정도를 정량적으로 평가하고자 하는 것이나, 외해역의 관측자료를 대상으로는 수위/흐름효과 고려에 따른 차이가 크지 않게 나타났다. 이에 추가적

으로 연안역에서의 비교 정점을 선정하여 앞서 언급한 방법과 동일한 방법으로 정확도 및 개선정도를 평가하였다. 비교점(CP)은 관측자료와의 비교는 불가하지만 수위/흐름효과의 고려 유무에 따른 연안역에서의 파랑변화 정도를 파악하고자 모델영역 내에서 수심이 얇고, 유속이 강하며, 파랑의 내습방향과 평행한 순방향(또는 역방향)의 흐름특성을 보이는 지역을 선정하였다. 비교 기간 선정은 수위나 흐름영향 이외에 바람이나 기압 등 외적요인의 변화가 거의 없고 파랑의 내습패턴 변화도 완만한 기간을 선정하였다. 비교점(CP)은 연평도 남서측 지점(경도 125-23-0, 북위 37-28-1)으로 지점에서의 수심은 15.3 m(D.L.)이다. 본 지점은 동계시 W~NW계열의 파랑이 우세하게 나타나며 수심이 얇고, 창·낙조류의 방향도 동·서방향으로 나타나면서 조차도 대조기시 4 m 정도로 수위/흐름효과에 따른 파랑변화를 검토하기에 적절한 위치로

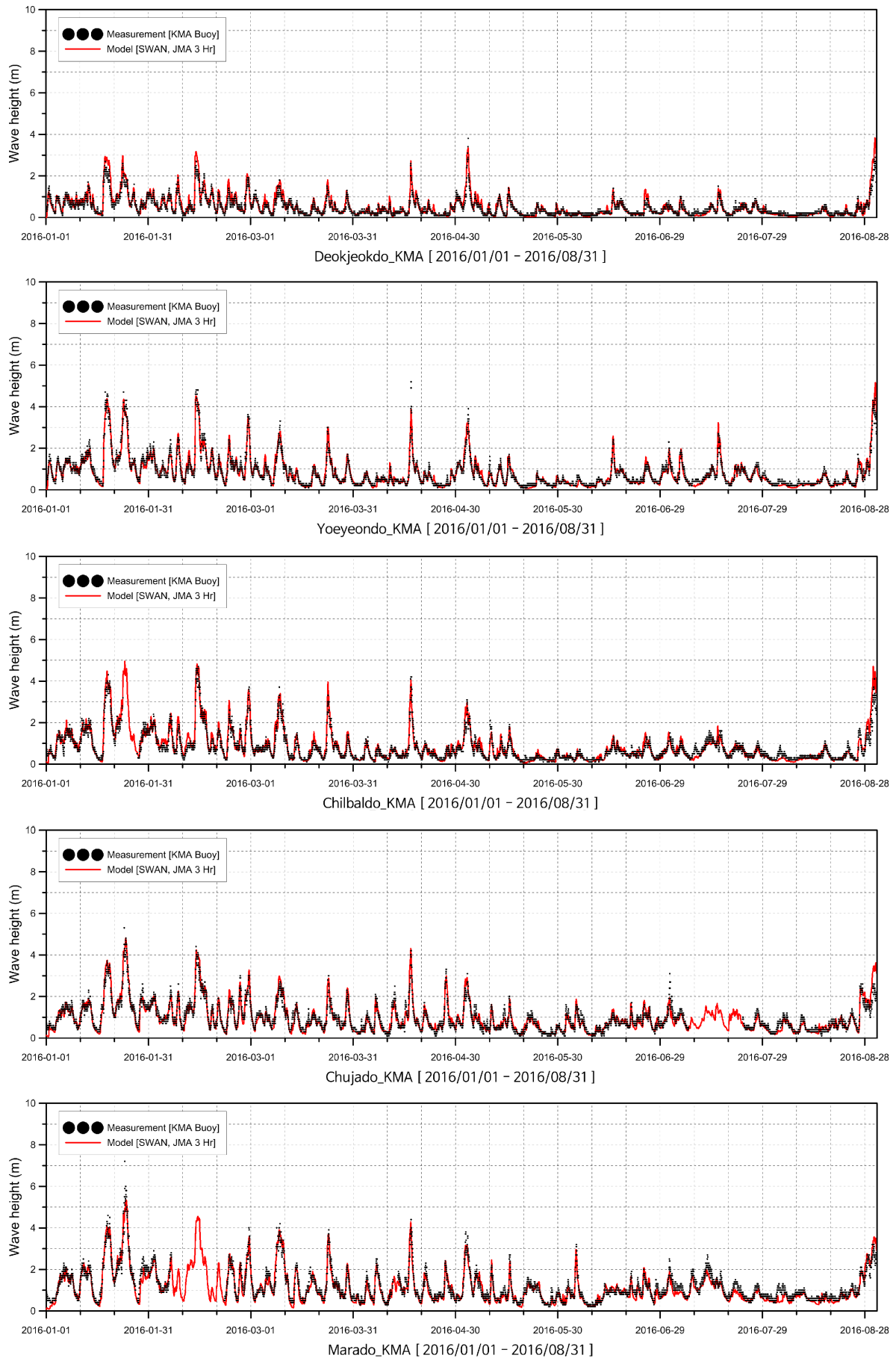


Fig. 5. Comparison of SWAN model result and observed data.

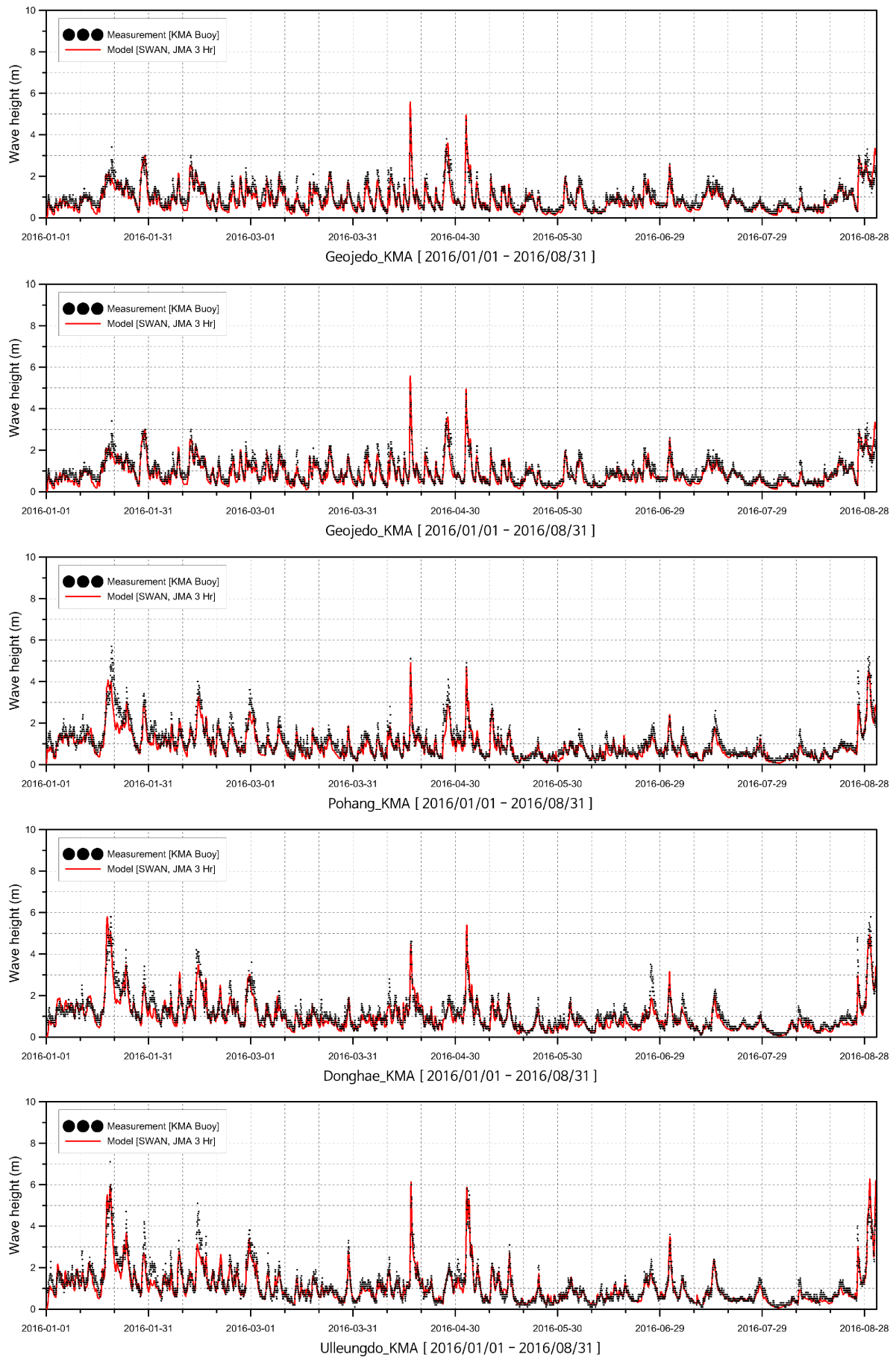


Fig. 5. Comparison of SWAN model result and observed data(continued).

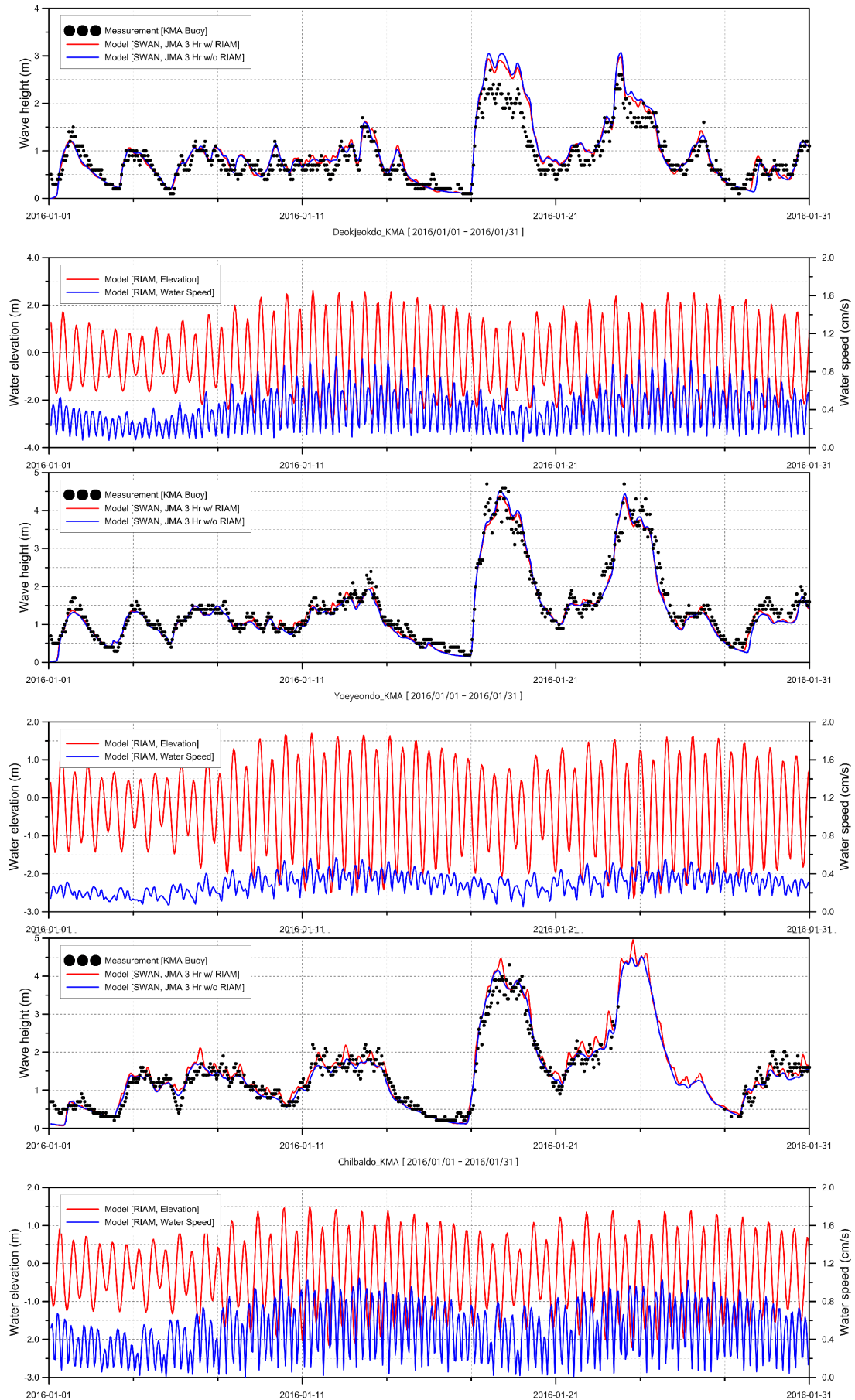


Fig. 6. Comparison of model result and observed data considering with and without water level change/currents.

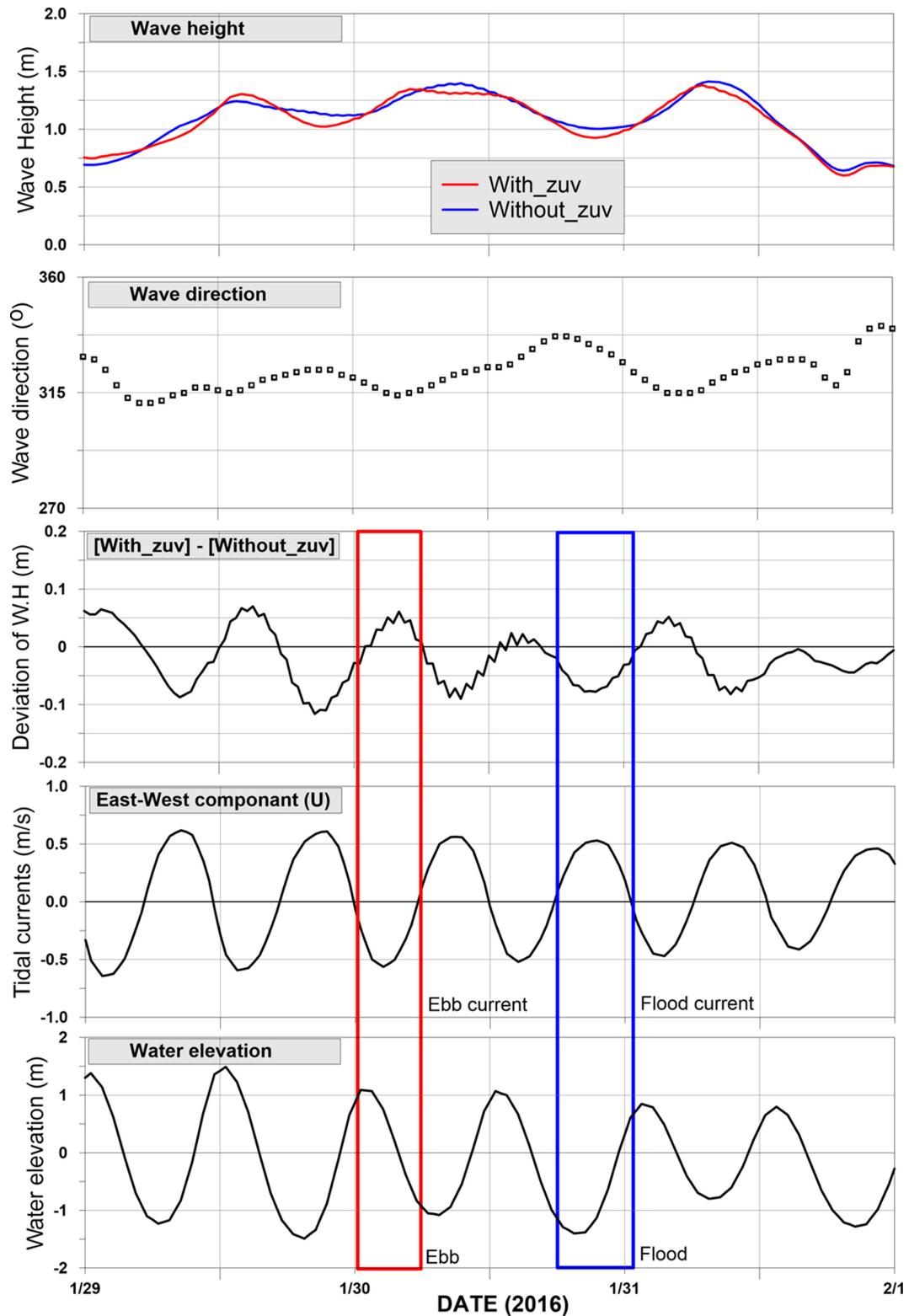


Fig. 7. Difference of wave height considering with and without water level change/currents.

적용하였다(Fig. 4).

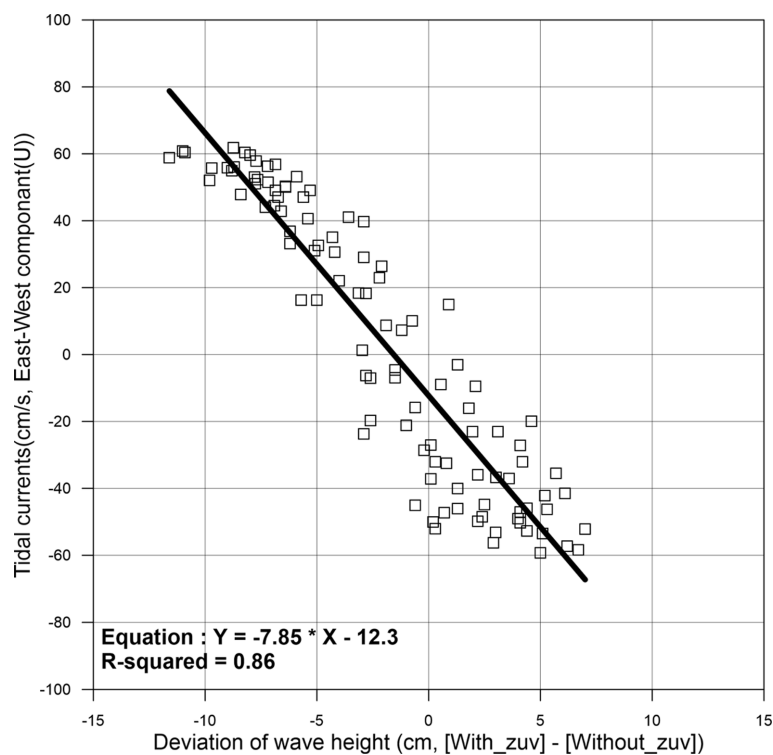
Fig. 4의 위치에서 2016년 1월 29일에서 2월 1일의 4일간의 수위/흐름효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 파고/파향, 파고편차, 유속(동방성분), 수위시계열을 Fig. 7에 제시하였다. 이 기간에는 NW계열의 파랑이 지속적으로 내습하였

으며, 파고는 0.7~1.4 m, 조차는 최대 3 m를 보였다. 여기서 파고편차는 수위/흐름효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 뺀 값이다. 파고편차는 그림에서 보는 바와 같이 뚜렷한 주기성을 갖고 있으며, 변동주기는 수위변화(조석주기)와 동일하게 나타나고 있다. 흐름방향과 파향을 비교하면 창조

Table 4. Comparison of RMSE for each cases.

Station	RMSE(cm)			
	Total computation time (2016.1.~8.)		Wave height (more than 2.5 m)	
	Considering	Not considering	Considering	Not considering
Deokjeok	3.7	4.0	41.4	56.7
Yoiyeon	3.6	3.7	22.7	24.7
Chilbal	5.8	4.8	30.6	22.4
Chuja	5.5	5.9	18.6	21.9
Mara	5.8	5.6	15.9	15.4
Geomun	6.6	7.3	36.3	36.5
Geoje	6.5	6.9	34.6	37.7
Pohang	10.7	10.9	69.9	71.1
Donghae	10.5	10.5	59.9	59.6
Ulleung	9.7	9.7	56.5	56.8
Average	6.8	6.9	38.6	40.3

Ref. Considering : Considering of water level change and currents

**Fig. 8.** Correlation between wave height deviation and tidal currents.

시(유향은 동향)에는 파랑과 흐름이 순방향, 낙조시(유향은 서향)에는 역방향 분포를 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 창조시에는 파고감소, 낙조시에는 파고증가가 뚜렷하게 나타나고 있으며 그 크기는 -10~7 cm 정도이다. 파고편차는 파고에 비하여 5~10% 수준이며, 이는 수위/흐름효과를 고려하였을 경우에 그렇지 않은 경우와 비교하여 5~10%의 파고변화가 나타날 수 있음을 의미한다. 또, 파고편차와 유속과의 상관도(R^2)는 0.86으로 높게 나타났다(Fig. 8)

앞서 언급한 Lee and Hur(2016)의 연구에서는 Navier-Stokes solver 기반의 수치수조(HYMO-WASS-3D)를 이용하여 파고 5 cm, 주기 1.5 sec, 유속 10, 20, 30 cm/s의 조건(파랑과 흐름은 역방향)으로 파랑-흐름 상호작용에 따라 파랑과 흐름이 만나는 지점에서 유속이 10 cm/s일 때 약 10%, 20 cm/s일 때 약 25%, 30 cm/s일 때 약 40%의 파고가 증가함을 보인다. 본 연구에서의 약 5~10%의 파고 증가에 비하여 큰 값이지만, 기존 연구결과는 수치수조실험으로 파고에 비

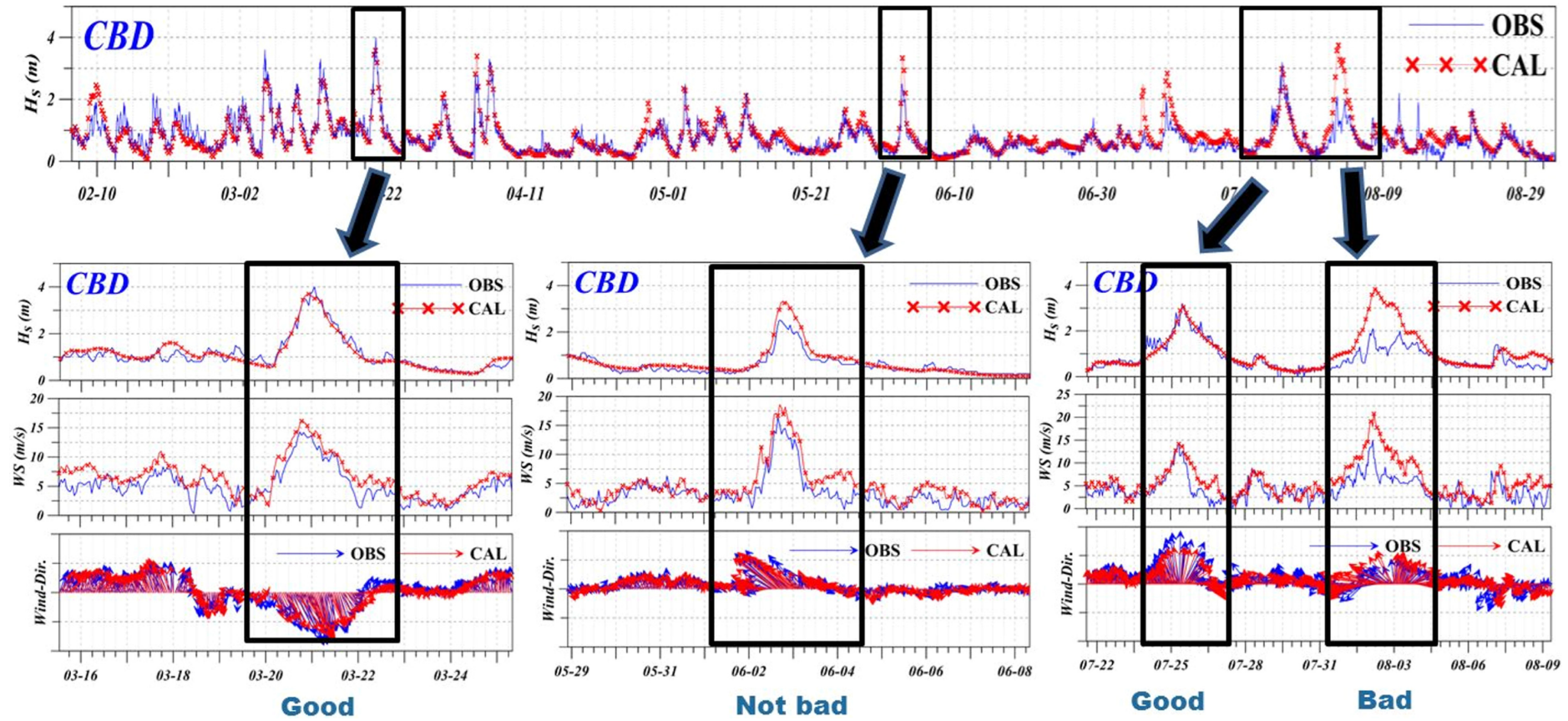


Fig. 9. Wave estimated results according to accuracy of wind data at Chilbaldo buoy.

해 매우 큰 유속이(과고 5 cm, 유속 10, 20 및 30 cm/s) 지속적으로 발생하는 조건하에서의 결과로서 본 연구결과와 직접적인 비교는 어렵다. 본 연구에서는 파랑-흐름의 상호작용에 따라 파고의 변화가 나타남을 실효역을 대상으로 실증하였다는 것에 의의가 있다.

본 연구에서는 수위/흐름효과를 고려한 경우 파고의 5~10% 정도의 변화가 생길 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 하지만 이러한 수위/흐름변화를 고려하는 것이 정도 높은 파랑예측 또는 후측(hindcasting)을 할 수 있음을 의미하지는 않는다. 이러한 복합요인을 고려하여 파랑을 산정하더라도 입력되는 바람장의 정확도는 무엇보다도 중요한 요소이다. Kang et al.(2016)은 바람자료의 정확도가 파랑예측 결과에 미치는 영향에 대하여 파고의 재현성은 풍향보다는 풍속의 영향을 많이 받고 있음을 지적한 바 있다. Fig. 9의 기상청 칠발도 해양관측부이자료(파고, 바람)와 모델후측자료에서 보는 바와 같이 파랑추산의 정확도는 다양한 물리적인 요소를 고려하는 것도 중요하지만 무엇보다도 정확한 바람자료의 입력이 가장 중요한 요소임을 알 수 있다. 또한 바람자료의 정확도는 자료의 공간해상도와 시간해상도에 의존할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수위변화와 흐름효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 각각 수치모델의 후 그 변화 특성을 검토하였다. 수치모델에 적용된 바람은 3개기관(ECMWF, NCEP, JMA)에서 제공하는 바람자료를 검토한 후 가장 정확도가 높은 JMA 바람자료를 적용하였으며, 모델에 입력된 해수유동장(수위, 흐름)은 RIAMOM 모델의 1시간 간격 자료를 적용하였다. 2016년 1월에서 8월까지의 8개월간의 수치모델 결과를 분석하여 RMSE를 산출하였으며, 수위변화와 흐름효과를 고려한 경우가 2.5 m 이상의 고파랑 내습기간 동안에 RMSE가 40.3 cm에서 38.6 cm로 줄어들어 수위/흐름효과를 고려할 경우 재현성이 향상되는 것으로 분석되었지만 유의미한 수준은 아닌 것으로 나타났다. 이는 파랑관측부이가 설치된 비교정점들이 연안에서 떨어진 외해역에 위치하고 있어 수위와 흐름변화에 다소 덜 민감하게 반응하였을 것으로 판단된다. 수심이 낮은 연안역 비교정점에서의 파고변화 검토결과, 연안역에서는 파랑과 흐름이 순방향(또는 역방향)으로 만나는 경우 5~10% 정도의 파고변화가 나타남을 확인하였다. 향후 이러한 비교정점에서 장기 파랑관측자료를 통하여 정량적인 비교를 수행하여 개선정도를 파악하는 것이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 이러한 복합요인을 고려하여 파랑후측(또는 예측)을 하는 것도 중요하지만 시-공간적으로 고해상도의 정도 높은 바람자료를 적용하는 것도 매우 중요한 요소일 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양과학조사 및 예보기술개발사업의 일환인 “연안이상현상(이상고파, 이안류) 발생원인 규명 및 대응체계 구축(No. 20140057)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Booij, N. (1981). Gravity waves on water with non-uniform depth and current. Report No. 81-1, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. of Technology.
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation, *J. of Geophysical Research*, 103(C4), 7649-7666.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, E. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden (1973). Measurement of wind wave growth and swell decay during the JOint North Sea WAVE Project(JONSWAP), *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, Vol. 12(A8), pp. 1-95.
- Hedges, T.S., Anastasiou, K. and Gabriel, D. (1985). Interaction of random waves and currents. *J. Wtrwy., Port, Coast. And Oc. Engrg.*, 111(2), 275-288.
- Hirose, N., 2011. Inverse estimation of empirical parameters used in a regional ocean circulation model, *J. Oceanogr.*, 67, 323-336.
- Hirose, N., C.H. Kim, and J.H. Yoon (1996). Heat budget in the Japan Sea, *J. Oceanogr.*, 52, 553-574.
- Hirose, N., K. Takayama, J.H. Moon, T. Watanabe, and Y. Nishida (2013). Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas, *Umi to Sora (Sea and Sky)*, 89, 43-51.
- Kang, S.W., S.J. Ahn, H.M. Eom and H.S. Cho (2009). Design Wave Transformation in Finite Depth due to Wave-Current Interaction. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 21(4), 308-315(in Korean).
- Kang, T.S., J.J. Park and H.S. Eum (2016). Wave Tendency Analysis on Coastal Waters of Korea Using Wave Hind-Casting Modelling, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol.22, No.7, pp.1-7(in Korean).
- Kirby, J.T. (1984). A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography. *J. Geophys. Res.*, 89(C1), 745-747.
- Lee, W.D. and D.S. Hur (2016). Analysis on Mechanism of Wave Attenuation under Wave-Current Interaction. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 36(4), 645-650(in Korean).
- Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. (1961). The changes of amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents. *J. Fluid Mechanics*, 10(4), 529-549.
- Perigrine, D.H. (1976). *Interaction of Water Waves and Currents*. Advances in Applied Mathematics, 16, Academic, New York, 9-17.
- RIAMOM homepage(<http://dreams-i.riam.kyushu-u.ac.jp/vwp/>)

- The SWAN team (2008). SWAN Cycle III version 40.72 Technical Documentation.
- Yoon, J.H. (1982a). Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part I. Formation of the East Korean Warm Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 43-51.
- Yoon, J.H. (1982b). Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part II. Influence of seasonal variations in atmospheric conditions on the Tsushima Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 81-94.
- Yoon, J.H. (1982c). Numerical experiment on the circulation in the Japan sea, Part III: Formation of the nearshore branch of the Tsushima Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 119-124.
- Yoon, J.H. (1982d). Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part III: Mechanism of the nearshore branch of the Tsushima Current, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 125-130.
-
- Received 21 November, 2016
1st Revised 14 December, 2016
2nd Revised 22 December, 2016
Accepted 27 December, 2016