전지구 파랑 예측시스템의 민감도 분석 Sensitivity Analysis of Global Wind-Wave Model

박종숙* · 강기룡*

Jong Suk Park* and KiRyong KANG*

요 지 : 파랑 모델에서 시공간적인 해상도의 변경은 결과에 많은 영향을 끼친다. 본 연구에서는 모델 입력장의 해상도 변경, 파랑 모델의 해상도 변경 그리고 물리적 옵션에 따른 모델의 민감도를 분석하였다. 모델의 분석을 위해서 전지구 부이관측자료와 위성자료를 이용하였다. 고해상도의 입력장을 사용할 경우 유의파고를 과대 산정하는 경향을 보였고, RSME는 약간 감소하였다. 고해상도의 파랑 모델을 수행할 경우 평균편향 및 RMSE가 약간 증가하였다. 또한, 유효 해상폭 계수를 기존의 값인 1.4보다 작게 설정할 경우 편향과 RMSE가 모두 감소하였다.

핵심용어 : 파랑, 파랑모델, 검증

Abstract : We studied the characteristics of spatial distribution of global wave height and carried out the model-sensitivity test by changing the input field, model resolution and physical factor (effective wind factor) since the spatial and temporal resolution in wind wave forecasting is one of most important factors. Comparisons among the different cases, and also between model, buoy and satellite data have been made. As a results of the wind-wave model run using the high resolution wind field, the bias of significant wave height showed the positive tendency and the Root-Mean Square Error(RMSE) was a bit decreased based on the comparison with buoy data. When the model resolution was changed to higher, the bias and RMSE was increased, and as the effective wind factor was smaller than default value(= 1.4) the bias and RMSE showed also decreasing pattern.

Keywords : wind waves, wind wave model, verification

1. 서 론

해양활동의 증가로 인하여 해상기상정보의 수요가 급격히 증가하고 있으며 선진국에서는 국내연안에서의 관측 범위를 외해로 확대하고 있으며 기존의 부이, 등표 등 국지적인 관측망 확대 및 위성을 이용한 해상풍 및 파랑 관측기술 개발을 진행하고 있다. 관측기술의 발전과 더불어 해양활동에 크게 영향을 끼치고 있는 파랑의 특성 및 예측기술에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 지난 수 십 년 동안 JONSWAP (Joint north sea wave project, Hasselmann et al., 1973), SWAMP(Sea wave modeling project, SWAMP Group, 1985), SWIM(Shallow water intercomparison of wave model, SWIM Group, 1985) 등의 파랑 모델 프로젝트를 통하여 파 스펙트럼의 성장 기작에 대한 연구가 이루어졌다. WAMDI(Wave model development and implementation, WAMDI Group, 1988)를 통하여 첫 번째 3세대 파랑모델이 개발되어 해상의 파랑의 예측하는 연구가 급속도로 발전되었으며 1990년도 초 NCEP(National Centers for Environmental

Prediction)에서 WAVEWATCH-III(WW3)이 개발된 후 지속적으로 모델이 향상되고 있다(Tolman, 1999a; 2002a; 2002e). 이러한 수치모델의 발전으로 인하여 ECMWF와 NCEP 그리고 NASA/DAO는 이미 파랑 재분석 자료를 완성하였고(Caires and Sterl, 2005), 전지구적인 파랑의 특징을 이해하고자 하는 많은 연구가 이루어지고 있다(Sterl et al., 1998; Cox and Swail 2001; Wang and Swail 2002). 또한, 많은 연구자들에 의해서 풍속에 의한 파랑모델의 민감도 실험이 연구되었다(Ponce and Ocampo-Torres, 1998; Bauer and Weisse, 2000; Abdalla and Cavalla, 2002; Moon et al. 2003). 이러한 연구들에서는 고품질의 풍속에 의해서 파랑 모델의 예측성이 크게 향상됨을 보였다. 이와 더불어 Suchandra et al.(2011)은 파랑 모델에서의 물리적인 옵션들에 대한 다양한 민감도 실험을 수행하였다. 국내연구로는 파랑 모델을 이용하여 한반도 주변의 파랑 분포 특성에 관한 연구가 수행되었다(문 등, 1998; 유 · 박, 2010).

기상청에서는 1999년 슈퍼컴 1호기 도입 이후 해상의 파랑예측을 위한 3세대 파랑 수치모델을 운영하고 있으며(박,

* 기상청/국립기상연구소 지구환경시스템연구과 (Corresponding author: Jong Suk Park, Global Environment System Research Division, National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea. Tel: 070-7850-6743, Fax: 02-841-2787, jsp98@korea.kr)

2000), 2005년 슈퍼컴 2호기의 성능 보강에 따라 현업에서 운영되는 모델의 대체 및 해상도 개선을 위한 작업이 진행되어 왔다. WAVEWATCH-III(Tolman, 2002e) 모델을 근간으로 하여 전지구 파랑 예측시스템(GWW3)이 개발되어 2009년부터 정식으로 현업 운영 중에 있다(박 등, 2008). 본 연구에서는 전지구 파랑 예측시스템의 예측 결과를 이용하여 한반도 주변으로 국한되었던 기존의 연구범위를 확장하여 전 지구적인 파랑의 특징을 살펴보고 해양의 부이 관측결과와의 비교 검증을 실시하였다. 또한 입력장 변경 및 파랑 모델의 해상도 변경에 따른 결과를 분석해 보았고, 물리적 옵션을 다르게 적용하여 민감도 실험을 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 파랑 모델 개요

해수면에서의 복잡한 양상을 나타내는 물결은 파고, 파장, 파주기 및 파향이 서로 다른 다수의 규칙적인 성분파가 겹쳐 지거나 합쳐진 형태로 구성되어 있다고 가정한 후 이러한 가정을 기초로 하여 물결을 조화 해석에 의해서 진동수, 진폭, 위상이 다른 다수의 정현파(sinusoidal wave)로 분해하여 해수면에서의 파의 성질을 분석하는 방법을 스펙트럴(spectral) 해석이라 한다. 스펙트럴 해석 방법으로부터 파랑 현상의 파라미터들, 유의파고, 침두 주파수 그리고 진동수 등의 관계를 유도할 수 있으며, 파랑 스펙트럼의 개념을 이용하여 파랑 수치 모델은 파랑 스펙트럼 에너지가 보존된다는 가정을 기본 방정식으로 사용하고 있다.

$$\frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + (C_g(f) + U) \cdot \nabla E(f, \theta) = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (1)$$

$E(f, \theta)$: 2차원 에너지 스펙트럼,

$C_g(f)$: 군속도, U : 해류 유속,

S : 원천항 또는 근원함수 (Source Function),

S_{in} : 바람에 의한 에너지 증가항,

S_{nl} : 성분파 상호간의 비선형 에너지 교환항,

S_{ds} : 마찰, 점성에 의한 에너지 소실항

위 식에서 좌변의 첫 항은 파랑 스펙트럼 에너지의 국지적 변화율을, 둘째 항은 파랑 스펙트럼 에너지가 군속도(wave number group velocity) 및 해류 속도에 의한 이류를 나타낸다. 우변은 원천 항들을 나타낸다. S_{in} 은 해상풍에 의한 에너지 증가항이며 S_{nl} 은 성분파 상호간의 비선형 에너지 교환항 그리고 S_{ds} 는 마찰 및 점성에 의한 에너지 소실항을 나타낸다. 본 연구에서 사용되는 방안 등은 다음과 같다. 비선형 성분파간 상호작용은 DIA(Discrete Interaction Approximation, Hasselmann et al., 1985)방식을 채택하고 있는데 발달중인 파랑의 중요한 물리 과정 중 스펙트럼 성분 간의 에너지 교환 과정을 수식화한 방식이다. 바람에 의한 에너지 입력 및 쇄

파에 의한 에너지 소산 과정은 Tolman and Chalikov(1996) 방식을 채택하였다. 바람에 의한 에너지 입력 원천항은 바람과 파랑의 상호작용에 의한 항력계수(drag coefficient)에 의해서 매개변수가 결정된다. 쇄파에 의한 에너지 소산은 저진동 성분과 고진동 성분을 분리하여 계산한 후 주어진 진동수에 대하여 선형적으로 결합된 형태로 사용된다. 해저 마찰에 의한 효과는 JONSWAP 모수화 방식을 사용한다(Hasselmann et al., 1973).

2.2 파랑 예측시스템 구성

Table 1은 파랑 모델의 환경설정을 나타낸 것이다. 전지구 파랑 모델은 남·북극 고위도 20° 지역을 제외한 경도 0°E~360°E, 위도 70°S~70°N 해역에 대한 파랑 예측을 목적으로 한다. 파랑 모델의 공간 해상도는 위, 경도 동일하게 1/2° 간격의 구면좌표계이며, 스펙트럼의 해상도는 최소진동수 0.0418 Hz에서 0.4114 Hz까지 25개의 파수를 가지며, 방향 분포 해상도는 10° 간격이다. 전지구 해양 수심격자 구성을 위하여 NGDC(National Geophysical Data Center)의 ETOPO5 전지구 수심자료를 파랑 예측시스템의 1/2° 해상도에 맞게 낮추어 사용하였다. 초기장은 12시간 전의 예측장을 사용하며, 입력 해상풍 자료는 기상청 전지구 예보 모델(UM N512L70)을 사용하였다. 해상풍 자료는 파랑 예측 시스템의 구면 좌표계로 변환되어 사용되며 6시간 간격으로 10.5일 예측자료로 1일 2회(00, 12UTC) 제공된다. 적분시간 정보에서는 공간이류 시간격을 720초로 설정한 후, 전역 시간격(Global time step)과 스펙트럼 내부 전이 시간격(Intra-spectrum propagation)을 2배수로 설정하였다.

2.3 연구 방법

본 연구에서는 3가지 방법을 통하여 전지구 파랑 예측시스템의 예측성을 분석해보았다. 첫째, 입력 대기장의 변화에 따른 예측 시스템의 성능을 분석해 보았다. 기상청에서는 2011년 5월 부터 고해상도 전지구 예보 모델인 UM N512L70(UMN512)을 운영하고 있다. UMN512는 동서방향으로

Table 1. Model description

Model Code	WAVEWATCH III (version 2.22)			
Model Coordinate	Spherical Coordinate			
Model Domain	0°E-360°E, 70°S-70°N			
Spatial Resolution	1/2°(720 × 281)			
Prediction & Staring Time	252 hour (00, 12UTC)			
Initial data	Previous Runs 12 hour Forecast			
Input data	UM N512L70			
Time step information (sec)	Global	Spatial propagation	Intra-spectrum propagation	source term
	1440	720	1440	720

0.3515625°, 남북방향으로 0.234375° 간격으로 약 25 km의 고 해상도 시스템이다. 이 시스템은 기존 UM N320L50(UMN320)에서 해상도가 변경되었고, 단파 및 장파복사에 관한 모수화 부분이 개선되었다. 고해상도 전지구 예측에 적합하도록 각종 물리과정이 개선되었으며 자료동화 과정, 그리고 전지구 예보 모델의 소프트웨어의 버전이 향상되었다. 이러한 대기장의 변화가 전지구 파랑 예측시스템의 예측성에 영향을 끼치는지 분석해 보았다.

두 번째는 파랑 예측 시스템의 해상도 변경에 따른 예측성 분석이다. 위에서 기술한 바와 같이 전지구 예보 모델의 해상도가 고해상도로 변경되면서 이에 맞게 전지구 파랑예측시스템의 해상도를 고해상도로 변경하여 그 결과를 분석해 보았다. 전지구 파랑 예측시스템의 해상도를 기존의 위, 경도 1/2°에서 1/4°로 변경하였고, 시간 적분 간격을 조정하였다. 전역과 스펙트럼 시간 간격을 기존의 1440 sec에서 900 sec로 축소하였고, 공간이류와 원천항의 시간격을 720 sec에서 450 sec로 줄였다. 또한 고해상도의 수심 격자망을 구성하였다. 입력장으로 사용되는 해상풍 자료는 UMN512의 결과를 사용하고, 파랑 예측시스템의 해상도에 맞게 해상풍의 해상도를 내삽하여 사용하였다.

마지막으로, 모델내의 해상풍의 모수화 과정에 사용된 인자를 조정하여 민감도 실험을 수행하였다. 본 시스템에서 해상풍에 의한 파에너지 생성과 소멸과 관련된 모수화 과정은 Tolman and Chalikov(1996)을 사용하고 있으며, 이 방안은 Kahma and Calkoen(1992)에 의해서 제안한 이론을 바탕으로 안정한 상태의 파의 성장을 충분히 유지시키는 효과를 위하여 유효 해상풍 계수를 사용하고 있다. 식 (2)처럼 모델내에서 입력장으로 사용되는 해상풍은 실제 해상풍(U_{10}) 대신에 유효 해상풍(U_e)을 사용한다. 식에서 ST 는 주요 안정도 계수이고, h 는 해상풍과 대기 온도의 참고 높이를 나타내고 c_1 과 c_2 는 서로 반대 부호를 나타낸다. 결국 식 (2)에서 유효 해상풍 계수(이하 c_0)를 조절함으로써 대기모델의 해상풍에 의해서 파랑 변수에 특별한 편향을 보일 때 보정하는 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 c_0 를 조절하면서 전지구 파랑 예측시스템의 주요 통계값의 변화를 분석하였다. 또한, 평균장의 분포도를 비교하기 위하여 1991-2000년까지 10년 동안의 ERA-40 재분석 자료와 NCEP/EMC에서 수행된 월평균 유의파고 값을 사용하였다. ERA-40 재분석 자료는 ECMWF 중기 전지구 예보모델을 이용하여 2.5°×2.5° 수평 격자계로 구성되어 있다. 3차원 변분법(3DVAR) 자료동화 기법을 이용하여 파랑-대기 결합모델의 형태로 수행되었으며, 파랑모델은 3세대 스펙트럴 모델인 WAM을 사용하였다. NCEP/EMC는 기상청의 파랑 예측시스템과 동일한 해상도를 가지며, WAVEWATCH-III ver.2.22 이용하여 hindcast 재분석 자료를 ftp 사이트를 통하여 제공하고 있다.

$$\frac{U_e}{U_{10}} = \left(\frac{c_0}{1 + C_1 + C_2} \right)^{1/2}$$

$$C_1 = c_1 \tanh[\max(0, f_1 \{ST - ST_0\})] \quad (2)$$

$$C_2 = c_2 \tanh[\max(0, f_2 \{ST - ST_0\})]$$

$$ST = \frac{hgT_a - T_s}{U_h^2 T_0}$$

파랑 예측 시스템의 검증에 사용된 관측 자료는 JCOMM (Joint Committee of Oceanography and Meteorology) 주관으로 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecast)에서 추진하고 있는 전세계 파랑 모델 운영기관 대상 비교검증 프로젝트에서 사용되는 부이 관측자료를 이용하였으며 검증 변수는 유의파고이다. 이 자료는 ECMWF ftp (ftp.ecmwf.int) 서버에서 사용자 계정과 패스워드를 입력한 후 내려 받는다. 또한, Jason-1(ftp://podaac.jpl.nasa.gov) 위성에서 관측된 유의파고 자료를 이용하였다. 모델의 예측 자료에 대해서 각각 월평균편향(편향: 모델-관측), 평방제곱근평균오차(RMSE) 그리고 상관계수를 계산하였다. 식(3)과 식(4)는 각각 평균편향과 RMSE의 계산식으로 N 은 검증자료의 개수이며, Y_{fcst} 와 Y_{obs} 는 각각 모델 및 관측값을 나타낸다. 식(5)는 상관계수의 계산식으로 $\overline{Y_{fcst}}$ 와 $\overline{Y_{obs}}$ 는 모델과 관측값의 평균을 나타낸다.

$$BLAS: bias = \frac{1}{N} \sum (Y_{fcst} - Y_{obs}) \quad (3)$$

$$Root Mean Square Error: RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (Y_{fcst} - Y_{obs})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$correlation : r = \frac{\frac{1}{N-1} \sum (Y_{fcst} - \overline{Y_{fcst}})(Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})}{\sqrt{\sum (Y_{fcst} - \overline{Y_{fcst}})^2} \sqrt{\sum (Y_{obs} - \overline{Y_{obs}})^2}} \quad (5)$$

3. 결 과

3.1 입력장 변화에 따른 전지구 파랑 예측시스템 분석

UMN320을 입력장으로 하여 수행된 전지구 파랑 예측시스템은 GWW3_N320으로 표시하였고, UMN512를 입력장으로 수행된 파랑 예측 시스템의 결과는 GWW3_N512로 표기하였다. 2011년 5월 한 달 동안 UMN320과 UMN512 해상풍을 입력장으로 사용하는 예측 시스템이 병행 운영 되어 모델의 검증에 이용하였다. Fig. 1은 해상도 차이에 따른 전지구의 바람장과 유의파고의 산점도를 표출하였다. UMN320 보다 UMN512의 해상풍이 좀 더 강하게 모의되었으며 이러한 영향은 유의파고의 결과에도 나타나고 있다. 그 동안의 선행연구에서 논의되었듯이, 고해상도의 모델은 저해상도의 모델에 비해서 조금 더 정교한 지형 자료를 이용하기 때문에 좁은 지형에서의 강한 기류를 모의하여 해상풍이 강하게 나타난 것으로 보인다.

이러한 결과는 관측자료의 검증에서 뚜렷이 나타난다. 전지구 부이 관측 자료를 이용하여 전지구 파랑 예측시스템의 예측 성능을 평가한 결과 두 모델 모두 과대 모의하는 경향

이 뚜렷이 나타나고 특히 GWW3_N512 가 GWW3_N320 보다 과대 모의하는 경향이 나타났다(Table 2,3, Fig. 2 참조). 특히 +96 과 +120 예보시간에서는 과대 모의하는 경향이 2배 이상 크게 나타났다. 평균편향에서 GWW3_N512가 GWW3_N320보다 크게 나타났지만, RMSE는 다소 줄어들었다. 또한 상관계수도 GWW3_N512가 약간 높게 나타났다. Jason -1 위성 관측 자료 이용하여 예측 성능을 평가한 결과 부이관측 자료와 동일하게 GWW3_N512가 GWW3_N320 보다 과대 모의하는 경향이 뚜렷이 나타났다. RMSE는 GWW3_N512 가 GWW3_N320보다 다소 높았으며 상관계수는 비슷하거나 약간 높게 나타났다. 부이 관측 자료의 경우 관측지점이 대부분 북반구에 밀집하고 있고, 대부분 연안에 가까이 설치되어 있기 때문에 대체로 유의파고의 값이 5 m 이하의 크기를

나타낸다. 반면 위성자료의 경우 유의파고의 극대 값이 많이 나타나는 남반구의 영역의 자료가 포함되기 때문에 부이 관측 자료에 비해서 유의파고의 분포가 넓게 나타난다. 이러한 이유로 평균편향 및 RMSE의 값이 위성자료를 이용하여 검증을 수행할 경우 좀 더 크게 나타난 것으로 사료된다. 고해상도의 바람장을 이용한 모델의 수행결과, 전체적으로 과대 모의하는 경향이 더욱 강해졌고, RMSE는 약간 증가하는 경향을 보였다. Abdalla and Cavaler(2002)의 연구에서도 전지구 해양에서 고해상도의 바람장을 사용할 경우, 바람장의 평균편향의 변화는 작지만, 파랑은 풍속에 비해서 좀 더 큰 평균편향을 보였다. 이러한 결과는 파랑의 생성과정에서 비선형 과정이 발생하며, 파랑이 풍속에 비해서 조금 긴 기억력을 가지고 있기 때문에 평균편향에서도 길게 지속되는 것으

Table 2. The significant wave height verification against buoy in May 2011

Bulk statistics	Model	Forecast time (hour)					
		0	24	48	72	96	120
RMSE	GWW3_N512	0.390	0.402	0.435	0.481	0.561	0.637
	GWW3_N320	0.396	0.406	0.439	0.485	0.573	0.650
bias	GWW3_N512	0.092	0.102	0.109	0.098	0.089	0.075
	GWW3_N320	0.071	0.078	0.079	0.07	0.047	0.015
Correlation coefficient	GWW3_N512	0.918	0.915	0.900	0.874	0.825	0.770
	GWW3_N320	0.914	0.910	0.894	0.867	0.806	0.743

Table 3. The significant wave height verification against Jason-1 in May 2011

Bulk statistics	Model	Forecast time (hour)					
		0	24	48	72	96	120
RMSE	GWW3_N512	0.700	0.714	0.739	0.793	0.882	1.013
	GWW3_N320	0.675	0.689	0.694	0.749	0.845	0.967
bias	GWW3_N512	0.263	0.269	0.285	0.274	0.249	0.263
	GWW3_N320	0.209	0.212	0.211	0.192	0.178	0.197
Correlation coefficient	GWW3_N512	0.920	0.918	0.914	0.896	0.858	0.813
	GWW3_N320	0.919	0.915	0.912	0.894	0.856	0.819

Fig. 1. Comparison between wind speeds(left-hand panel) and significant wave height (right-hand panel) from different resolutions.

Fig. 2. The GWW3_N512(black bar) and the GWW3_N320(gray bar) significant wave height verification in May 2011. Upper panel and lower panel represent verification against buoy and Jason-1 satellite measured wave height, respectively. bias, RMSE and correlation appear from left.

로 분석되었다.

3.2 고해상도 전지구 파랑 예측시스템 구축을 통한 결과 분석

고해상도로 구축된 전지구 파랑 예측시스템은 2011년 7월부터 12월까지 6개월 동안 수행하였다. Fig. 3은 예보시간에 따른 해상풍과 유의파고의 RMSE를 나타낸 것이다. 고해상도 수평격자계로 수행된 결과는 GWW3_R025으로 표현하였고, 기존의 해상도로 수행된 결과는 GWW3_R050으로 표

현하였다. 해상풍의 경우 +72, +120 예보시간에서는 거의 변화가 없고, +00 예보시간의 경우 10월, 11월 그리고 12월에서 RMSE 약간 증가하는 경향을 보였다(Table 4 참조). 반면, 부이자료와 위성 자료를 이용하여 유의파고를 검증한 결과 해상풍의 결과와는 다르게 RMSE가 증가하는 경향이 두드러지게 나타나며, 특히 +72 과 +120 예보시간에서 이러한 경향이 더욱 뚜렷이 나타나고 있다(Table 5 참조). 또한, 위성자료를 이용한 검증 결과는 부이자료를 이용한 검증결과에 비해서 RMSE 증가폭이 더욱 크게 나타났고, 72시간 예보시간

Table 4. The RMSE of wind speed against buoy for Jul.~Dec. 2011

Forecast time (hour)	Model	Month					
		Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
00	GWW3_R025	1.592	1.663	1.76	1.779	1.748	1.929
	GWW3_R050	1.572	1.579	1.685	1.697	1.632	1.826
72	GWW3_R025	2.300	2.509	2.664	2.780	2.875	3.276
	GWW3_R050	2.303	2.506	2.669	2.772	2.843	3.274
120	GWW3_R025	2.883	3.170	3.540	3.484	3.662	4.383
	GWW3_R050	2.876	3.185	3.538	3.489	3.649	4.410

Table 5. The RMSE of significant wave height against buoy for Jul.~Dec. 2011

Forecast time (hour)	Model	Month					
		Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
00	GWW3_R025	0.357	0.394	0.459	0.505	0.569	0.594
	GWW3_R050	0.324	0.430	0.487	0.489	0.559	0.573
72	GWW3_R025	0.451	0.495	0.604	0.648	0.704	0.752
	GWW3_R050	0.418	0.466	0.573	0.625	0.688	0.739
120	GWW3_R025	0.548	0.642	0.811	0.843	0.914	1.069
	GWW3_R050	0.526	0.609	0.779	0.806	0.899	1.047

Table 6. The RMSE of significant wave height against Jason-1 for Jul.~Dec. 2011

Forecast time (hour)	Model	Month					
		Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
00	GWW3_R025	0.561	0.567	0.556	0.699	0.525	0.617
	GWW3_R050	0.510	0.489	0.627	0.556	0.535	0.514
72	GWW3_R025	0.689	0.738	0.696	0.807	0.709	0.751
	GWW3_R050	0.613	0.636	0.639	0.661	0.674	0.634
120	GWW3_R025	0.811	0.951	0.968	0.954	0.91	0.933
	GWW3_R050	0.753	0.824	0.874	0.817	0.847	0.843

Fig. 3. Comparison between surface wind speed and significant wave height verification during July~December 2011. Upper panel represents verification of wind speed against buoy, middle panel represents verification against buoy measured wave height, and lower panel represents verification of significant wave height against Jason-1 satellite measured wave height.

에 대해서 6개월 동안의 RMSE를 평균한 결과 GWW3_R025는 0.73 m, GWW3_R050은 0.64 m로 나타났다 (Table 6 참조). 파랑 모델의 해상도 변경은 해상풍의 경우 큰 영향을 끼치지 않지만 파랑 변수의 결과에는 적지 않은 영향을 끼친 것으로 보인다. Cavaleri and Bertotti(2004) 연구에서처럼, 유의파고의 변동은 입력되는 해상풍이 가장 큰 요인이기도 하지만 모델에서 시공간적으로 적분된 결과이기 때문에 해상도 변경도 유의파고의 변동 요인으로 작용한 것으로 사료된다.

3.3 물리적 변화에 따른 민감도 분석

Table 7은 각 실험별로 설정된 유효 해상풍 계수를 나타낸

것이다. S140은 기존의 전지구 파랑예측시스템의 환경설정 값으로 c_0 를 기존과 같이 1.4로 설정하였고, S135는 c_0 는 1.35로 설정하였다. S130과 S125는 1.25와 1.20으로 각각 설정하였다. c_0 의 크기는 모델의 성능 향상이 나타낼 것으로 예상되는 수준으로 임의로 설정하였다. 현업에서 운영되고 있는 전지구 파랑 예측시스템은 +252시간까지 예측장이 생산되지만, 본 연구에서는 실험에 따른 유효 해상풍의 변화가 모

Table 7. Tested model version with respect to parameter c_0

experiment	S140	S135	S130	S125
c_0	1.4	1.35	1.3	1.25

Fig. 4. Mean field of significant wave height in July 2011. (a) ERA-40, (b) NCEP/EMC, (c) GWW3_S140, (d) GWW3_S135, (e) GWW3_S130, (f) GWW3_S125.

Fig. 5. Same as Fig. 4, But for in December.

텔에 끼치는 영향을 분석하는 것이 주된 목적이기 때문에 +120시간 까지만 모델을 수행하였다. 여름철 및 겨울철의 유

의과고 경향을 분석하기 위하여 2011년 7월부터 12월까지 4개의 실험에 대해서 모델을 수행하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 각

실험별로 수행된 7월과 12월의 유의파고 평균장을 나타낸 것이다. 일반적으로 각 반구의 겨울철에 해당되는 계절에 파고가 높게 분포한다. 적도를 비롯한 아열대 지역은 1년 내내 낮은 파고를 나타내고 인도양의 경우 여름에 남서 계절풍이 탁월하여 겨울보다 파고가 전반적으로 높게 나타난다. 이러한 경향은 GWW3 에서도 잘 나타나고 있다.

7월은 남반구의 경우 겨울철에 해당하기 때문에 북반구에 비해서 파고의 높이가 매우 높으며 4 m 이상의 높은 유의파고가 떠의 형태를 보이고 있다. ERA-40 재분석 자료는 남위 50°, 동경 90° 부근에서 높은 파고 분포를 보이고 있다. 같은 모델과 똑같은 수평 격자계를 사용하는 NCEP/ECM 와 GWW3 는 서경 160° 부근에서 강한 유의파고 분포를 보이고 있고, 재분석 자료에 비해서 광범위하게 퍼져있는 모습을 보이고 있다. 위도 30°N 이상의 북반구에서는 대부분 2 m 이하의 파고분포를 보이고 있으나 북대서양과 일본열도 남동쪽으로 2 m 이상의 파고가 좁게 분포하고 있는데 이것은 태풍의 영향으로 인한 것으로 보인다. 유효 해상풍 계수가 작아질수록 유의파고도 작아지는 모습을 보이고 있으며 특히 적도부근에서의 2 m 등치선이 서서히 축소하는 경향을 보이고 있다. 또한, S130와 S125 실험에서 태풍에 의해서 나타나는 높은 유의파고 경향이 점차 약화되는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Tolman(2002d)의 연구에서도 재현되었다. c_0 를 작은 값으로 설정할 경우 태풍 경로에서의 유의파고의 과대 모의 경향이 다소 완화되는 결과를 보였지만, 동시에 열대지역에서의 과소 모의하는 경향이 다시 발생하여 두 현상은 서로 연결이 되어있다고 밝혔다. 따라서 Tolman(2002d)은 전지구 영

역에서 평균편향이 가장 작고 부이지점에서 관측된 값과의 비교를 통하여 1.38을 c_0 값으로 설정하였다.

12월은 ERA-40 재분석 자료에서 나타나듯이 북반구의 알류산 저기압 부근의 넓은 면적에 걸쳐 유의파고가 높게 나타나며 북대서양에서도 높은 유의파고가 나타난다. 또한, 북반구에 비해 상대적으로 남반구의 유의파고가 낮게 나타난다. NCEP/ECM와 GWW3도 비슷한 경향을 보이고 있으나, ERA-40 재분석 자료에 비해 북대서양의 파고가 6 m 이상으로 매우 높게 나타나 것을 확인 할 수 있다.

지금까지 유의파고의 평균장을 통하여 c_0 가 모델내의 모수화 과정에서 실제 해상풍의 크기를 약화시키는 효과를 정성적으로 확인하였다. 각 실험별로 예측성능을 분석하기 위하여 실제 관측 값과 비교해 보았다.

Fig. 6. Probability distribution of significant wave height according to the effective wind factor.

Fig. 7. Scatter diagram of significant wave height against buoy observation (+72hour) for Jul.-Dec. 2011. The effective wind factor was lower from top to bottom.

Fig. 8. The significant wave height verification for six months. Bar chart represents and solid line represent bias and RMSE, respectively.

Fig. 6은 7월 한달 자료를 이용하여 부이 관측 지점에서의 각 실험에 따른 유의파고의 확률분포도를 나타낸 것으로, 임의로 0.2 m 간격으로 나누어 분석하였다. 관측지점에서 관측된 유의파고, 각 실험에서 산출된 유의파고를 0.2 m 간격으로 분류하여 그 구간에 포함되는 개수를 산정한 후 총 개수로 나누었다. 전체적으로 유의파고가 2 m 이하의 값이 대부분이며 4 m 이상의 값은 드물게 나타나고 있다. 부이 지점에서 관측된 유의파고는 1 m와 1.5 m 부근에서 피크 값을 보이고 있고 그래프가 가장 왼쪽으로 치우쳐있다. S140의 경우 1.5 m 이상에서 피크 값을 보이며 다른 실험에 비해서 가장 오른쪽으로 치우쳐 있어 전반적으로 유의파고의 값이 다른 실험에 비해서 크다는 것을 알 수 있으며 관측값과 가장 상이한 분포를 보이고 있다. 또한 2~3.5 m 사이의 유의파고의 값이 다른 실험에 비해서 월등히 높은 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면에 1.5 m 이하의 낮은 유의파고에서는 관측에 비해서 S140의 그래프가 낮게 나타나는 것으로 보아 유의파고 값의 변화가 다른 실험에 비해서 매우 크다는 것을 알 수 있다. S125으로 갈수록 유의파고의 피크 값이 점점 작아지고 그래프의 양상이 점차 관측 값의 그래프와 근접한 모습을 보이고 있다.

Fig. 7은 모델과 부이 관측자료와의 산점도를 나타낸 것으로 월별의 차이가 크게 나타나며, 전반적으로 여름철에 비해서 겨울철의 파고가 매우 높게 나타나며 산점도의 퍼짐현상도 여름철보다 겨울철에 더욱 뚜렷하다. 앞서 설명한대로 부이 지점들이 대부분 북반구에 위치해 있어 계절의 변화에 민감하게 반응하는 것을 확인 할 수 있었다. 계수가 작아질수록 산점도의 기울기가 점차 낮아지고, 여름철보다 겨울철의 폭이 더욱 크게 나타난다.

Fig. 8은 각 실험에 따라 6개월 동안의 월평균편향과 RMSE를 평균한 그림으로 y축의 왼쪽은 월평균편향, 오른쪽은 RMSE의 범위를 나타낸 것이다. 부이 관측자료와 위성 검증 자료를 이용한 검증에서 S140의 경우 전체 예보시간에 대해서 과대 산정 경향이 크게 나타나며, S135의 경우 과대 산

정 경향을 보이고 있지만, 그 크기는 작다. 반면 부이 자료를 이용한 검증에서 S130과 S125는 과소 산정 경향을 보이고 있고, 위성 자료를 이용한 검증에서는 S125만 과소 산정 경향을 보이고 있다. 부이 관측 자료를 이용하여 RMSE를 분석한 결과, 계수가 작아지면서 RMSE도 함께 작아지는 경향을 보였다. 다만, +00 예보시간의 경우 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 위성 자료를 이용했을 경우 계수가 작아질수록 RMSE가 모두 감소하는 경향이 뚜렷이 나타나고 있으며, 이것은 유의파고의 계절에 따른 변동이 남반구에 비해서 북반구가 크다는 것을 재확인 하는 결과로 보인다. 따라서 전 지구적인 파랑의 흐름과 기존의 연구 결과를 참조할 때 유효 해상폭 계수는 현재의 1.4보다 1.35로 조정하는 것이 모델의 예측성 향상에 도움이 될 것으로 사료된다.

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 파랑 모델의 입력장 변경 및 파랑 모델의 해상도 변경, 그리고 물리적인 옵션을 변경하여 전지구 파랑 예측시스템을 수행하였고, 산출된 파랑 예측 결과와 전지구 부이 및 위성 관측자료와의 비교를 통해서 파랑의 공간적인 특성 및 파랑 모델의 민감도를 분석하였다. 검증에 사용된 자료는 전지구 계류부이 관측자료와 Jason-1 위성 관측이다. 고해상도 전지구 예보 모델의 해상도를 입력장으로 하여 파랑 모델에서 산출된 자료를 부이자료와 검증해 본 결과 저해상도 해상도를 입력장으로 사용한 파랑 모델에 비하여 과대 모의하는 경향이 강하게 나타났지만, RMSE는 다소 줄어들었다. 하지만 위성자료와의 검증결과 과대 모의하는 경향이 더욱 뚜렷해졌고, RMSE도 약간 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 파랑의 생성과정에서 비선형 과정이 발생하며 풍속에 비해서 파랑은 긴 기억력을 가지고 있기 때문에 평균편향이 크게 나타난 것으로 사료된다.

파랑모델을 1/2°에서 1/4°의 고해상도로 변경하였을 경우 유의파고를 과대 모의하는 경향이 커지고 RMSE도 커지는 경

향을 보였다. 모델에서의 풍속의 크기를 조절하는 유효 해상 풍 계수를 조절하여 모델을 수행한 결과 현재 사용하고 있는 계수보다 작은 값으로 설정(기준 1.4 → 1.35)할 경우 평균편향 및 RMSE가 감소하는 결과를 보였다. 반면 모델의 검증에 사용된 부이자료는 대부분 북반구에 밀집하고 육지부근에 위치하고 있어 위성자료를 이용한 검증 결과와 다소 상이한 결과를 보이기도 하였다. 위의 3가지 방식을 통하여 파랑 모델의 민감도 실험 결과는 기존의 연구에서 밝혀진 바와 같이 입력장으로 사용되는 해상풍의 해상도와 파랑모델 자체의 해상도에 따라서 파랑 모델의 결과가 달라지는 것을 확인하였다. 또한, 해상풍과 관련된 모수화 과정에서 해상풍의 특성에 맞는 적절한 물리적 옵션을 선정하는 연구가 심도 있게 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청/국립기상연구소 주요사업인 “관측지진기 술감시 지원 및 활용연구(NIMR-2012-B-3)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 문일주, 오임상, 이동은, 윤용훈, 정순갑, 조주용 (1998). 한국근해의 파랑예측을 위한 제3세대 파랑모델 WAM의 적용, 한국기상학회지, 34(3), 446-455.
- 유승협, 박종숙 (2010). 지역 파랑 예측시스템과 해양기상 부이의 파랑 특성 비교 연구, 한국해양공학회지, (4(6호), 7-15.
- 박상욱 (2000). 기상청 파랑 수치예보 시스템, 예보국 수치예보과 기술노트 2000-2, 기상청, 88pp.
- 박상욱, 박종숙, 김금란 (2008). 전구 고해상도 파랑 예측시스템, 지구환경시스템연구과 기술보고서 2008-1, 국립기상연구소, 98pp.
- Abdalla, S. and Cavaleri, L. (2002). Effect of wind variability and variable air density on wave modeling. J. Geophys. Res., 107, C7, 17-1-20.
- Bauer, E. and R. Weisse (2000). Determination of high-frequency wind variability from observations and application to North Atlantic wave modeling. J. Geophys. Res., 105, C11, 26179-26190.
- Caires, S. and A. Sterl (2005). 100-year return value estimates for ocean wind speed and significant wave height from the ERA-40 data. J. Climate, 18, 1032-1048.
- Cavaleri, L. and Bertotti, L. (2004). Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. Tellus, 56, 167-175.
- Cox, A. T. and V. R. Swail (2001). A global wave hindcast over the period 1958-1997: Validation and climate assessment. J. Geophys. Res., 106, 2313-2329.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carison, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. (1973). Measurements of Wind-wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Erg. Dtsch. Hydrogr. Z, Reihe A(8), No. 12, p 95.
- Kahma, K.K. and Calkoen, C.J. (1992). Reconciling discrepancies in the observed growth rates of wind waves. J. Phys. Oceanogr., 22, 1389-1405.
- Moon, I.-J., Ginis, I., Hara, T., Tolman, H.L., Wright, C.W. and Walsh, E.J. (2003). Numerical simulation of sea-surface directional wave spectra under hurricane wind forcing, J. Phys. Oceanogr., 33, 1680-1706.
- Ponce, S. and Ocampo-Torres, F.J. (1998). Sensitivity of a wave model to wind variability. J. Geophys. Res., 103, C2, 3179-3202.
- Sterl, A., G. J. Komen and P.D. Cotton (1998). Fifteen years of global wave hindcasts using winds from the European Centre for Medium-range Weather Forecasts reanalysis: validating the reanalyzed winds and assessing the wave climate. J. Geophys. Res., 101(C3), 5477-5492.
- Suchandra, A., B., Kumar, R., Chaudhuri, S. and Sarkar, A. (2011). Sensitivity study of a coastal wave model for prediction of ocean waves over indian ocean region. Marine Geodesy, 34, 167-180.
- SWAMP Group (1985). Ocean Wave Modelling. Plenum Press, p 256.
- SWIM Group (1985). A Shallow Water Intercomparison of Three Numerical Wave Prediction Models (SWIM), Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111, 1087-1112.
- Tolman, H.L. (1999a). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. Tech. Note 166, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 110pp.
- Tolman, H.L. (2002a). Alleviating the garden sprinkler effect in the wave models. Ocean Mod., 4, 269-289.
- Tolman, H.L. (2002d). Testing of WAVEWATCH-III version 2.22 in NCEP's NWW3 ocean wave model suite. Tech. Note 214, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 99pp.
- Tolman, H.L. (2002e). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Tech. Note 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 133pp.
- Tolman, H.L. and Chalikov, D.V (1996). Source terms in a third-generation wind-wave model. J.Phys. Oceanogr., 26, 2497-2518.
- WAMDI group (1988). The WAM model-a Third Generation Ocean Wave prediction Model. J. Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810.
- Wang, X.L. and Swail, V.R. (2002). Trends of Atlantic wave extremes as simulated in a 40-year wave hindcast using kinematically reanalyzed wind fields. J. Climate, 15, 1020-1034.

원고접수일: 2012년 9월 3일

수정본채택: 2012년 10월 5일 (1차)

2012년 10월 12일 (2차)

2012년 10월 16일 (3차)

게재확정일: 2012년 10월 22일