

앙상블 지역 파랑예측시스템 구축 및 검증 Development and Evaluation of an Ensemble Forecasting System for the Regional Ocean Wave of Korea

박종숙* · 강기룡* · 강현석*
JongSook Park*, KiRyong Kang* and Hyun-Suk Kang*

요 지 : 해양파랑 예측에 있어 단일 수치모델의 불확실성을 보완하기 위하여 앙상블 기법을 적용한 지역 파랑예측 시스템을 구축하였다. 기상청 전지구 대기 수치모델의 확률예측시스템에서 생산되는 24개 앙상블 해상풍을 입력자료로 이용, 87시간까지 파랑 예측자료를 생산하였으며, 기상청 계류부이 관측자료와 다양한 통계방법을 적용하여 검증을 수행하였다. 2일예측 이후의 앙상블 예측평균의 평균제곱근오차(RMSE)는 단일모델예측에 비하여 향상된 결과를 보였으며, 특히 3일예측의 경우 단일모델예측 대비 RMSE가 약 15% 정도 향상되었다. 이것은 앙상블 기법이 수치모델의 불확실성을 감소시켜 예측정확도 향상에 크게 기여한 것으로 보인다. ROC(Relative Operating Characteristic) 분석결과, 전체 예측시간에 대하여 ROC 영역이 모두 0.9 이상을 보여 확률예측 성능이 뛰어남을 보였으며, 앙상블 파랑예측 결과가 해상 확률예보에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 해양파랑, 앙상블 기법, 확률예보

Abstract : In order to overcome the limitation of deterministic forecast, an ensemble forecasting system for regional ocean wave is developed. This system predicts ocean wind waves based on the meteorological forcing from the Ensemble Prediction System for Global of the Korea Meteorological Administration, which is consisted of 24 ensemble members. The ensemble wave forecasting system is evaluated by using the moored buoy data around Korea. The root mean squared error (RMSE) of ensemble mean showed the better performance than the deterministic forecast system after 2 days, especially RMSE of ensemble mean is improved by 15% compared with the deterministic forecast for 3-day lead time. It means that the ensemble method could reduce the uncertainty of the deterministic prediction system. The Relative Operating Characteristic as an evaluation scheme of probability prediction was bigger than 0.9 showing high predictability, meaning that the ensemble wave forecast could be usefully applied.

Keywords : ocean waves, ensemble forecasting system, probability prediction

1. 서 론

대기 및 해양 등 자연을 예측하기 위한 수치모델링은 초기 조건 차이 또는 예측모델의 작은 불확실성에 의해서 예측오차를 초래한다. 수치모델이 불확실성을 포함하는 이유는 다음과 같다. 첫 번째는 수치모델 초기 조건의 오차이다. 초기 조건의 오차에는 관측기기가 포함하는 오차와 관측자료의 부족 등이 있으며 이러한 초기 조건에서 발생된 오차는 수치 적분과정에서 점점 실제 해양상태와 멀어지게 되고 수치예측의 의미를 잃게 된다. 두 번째는 수치물리과정과 역학과정에서 발생하는 오차로 실제 해양상태를 묘사하기 위한 모수화 과정에서 발생된다(Buizza et al., 2005). 세 번째는 모델의 경계조건에서 발생하는 오차로 지역모델의 경우 적분시간이 길

어질수록 경계면 자료의 영향을 크게 받는다. 이러한 수치모델의 불확실성에 대한 한계를 보완하는 방법으로 앙상블 예측기법이 널리 이용되고 있다(Palmer, 2001). 특히 앙상블 기법은 수치 예측 초기 조건의 불확실성을 나타내기 위해 서로 다른 초기조건들을 이용하여 수치모델 적분을 수행하는 것으로 다양한 시나리오의 가능성을 파악할 수 있어 단일예측을 수행할 때 보다 예측성능을 향상시킬 수 있는 통계적 예측 방법이다.

파랑 수치 예측모델도 물리과정, 경계면 상태 그리고 초기장의 차이에 의해 예측에 불확실성이 발생한다. 파랑과 폭풍해일 같은 해양기상은 대기로부터의 기압 및 해상풍의 영향에 직접적으로 반응한다. 해양기상 예측모델에서의 불확실성에 대한 기여도를 실험한 결과 초기장의 불확실성에 대한 영

*국립기상과학원 지구시스템연구과(Corresponding author: JongSook Park, Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea, Tel: +82-64-780-6725, Fax: +82-64-738-6514, jsp98@korea.kr)

향은 매우 미비하나 대기입력장에 의한 불확실성은 전체 예측 시간에 대하여 매우 유의한 결과를 보였다(Flowerdew et al., 2010). 이러한 개념을 이용하여 유럽중기예보센터(ECMWF)와 미국 국립환경예보센터(NCEP)에서는 전지구 및 지역 규모의 양상블 파랑예측시스템을 구축하였고, 현업운동을 통하여 양상블 파랑 예측정보를 제공하고 있으며, 부이 관측자료와 확률예측의 성능을 검증한바 있다(Cao et al., 2009; Saetra and Bidlot, 2004). 또한 Bunney and Saulter(2015)은 대서양과 영국 연안에 대하여 양상블 지역 파랑예측시스템을 구축하여 단기예측에서의 파랑의 예측확률을 검증하였으며, 특히 파랑기후의 지역적인 차이가 검증의 편차로 이어지고, 이것은 양상블 예보의 성능에 크게 영향을 주었다. 국내에서는 파랑예측 모델 개발 및 검증에 관한 연구 및 태풍 등 위험기상에서의 해양 예측성 향상을 위한 접합모델 개발 등이 연구된 바가 있다(Moon and Oh, 2003; You and Park, 2010).

양상블 지역 파랑예측시스템은 기상청의 전지구 대기 양상블 예측시스템(Ensemble Prediction System for Global; EPSG) 자료를 기반으로 구축되었으며, 이 시스템은 기상청 국가기상슈퍼컴퓨터 4호기에서 실시간으로 운영되고 있다. 본 연구에서는 이 시스템의 구축현황을 설명하고 기상청에서 운영하고 있는 우리나라 주변 해역의 계류부이 관측 자료를 이용하여 양상블 지역 파랑예측시스템의 예측성능을 검증하였다.

2. 시스템 구축 및 예측성 검증

양상블 지역 파랑예측시스템은 EPSG의 10 m 고도의 해상풍 예측자료를 입력받아 수행된다. EPSG의 섭동장은 양상블 트랜스폼 칼만필터(Ensemble Transform Kalman Filter)와 하층 기온 및 풍속 등 지상변수의 스프레드를 향상시키기 위하여 SST 섭동방법을 이용하여 생산한다. 각 멤버들의 모델오차를 고려하기 위하여 사용된 통계물리 방법은 두 가지이다. 수치예측 물리과정에서 모수화에 사용된 경험상수들의 불확실성을 고려한 모수섭동(Random Parameter)과 아격자 규모에서 수치모델이 표현하지 못하는 모형의 불확실성을 확률론적으로 표현한 SKEB(Stochastic Kinetic Energy Backscatter) 방법이다(Berner et al., 2009). 기상청은 슈퍼컴퓨터 4호기 도입에 따른 고해상도 현업수치예보시스템의 실시간 운영체제를 완료하여 2016년 6월부터 슈퍼컴퓨터 4호기 기반의 고해상도 현업수치예보시스템 개선버전에 대하여 현업 운영하고 있다. 이에 전지구 대기 양상블 예측시스템의 수평해상도가 기존의 40 km에서 32 km로 증가하였고 역학과정의 변경 등 개선이 이루어졌다. 모델은 연직으로 70개 층으로 이루어져있으며, 2회/1일 운영되며 12일까지 예측자료가 생산된다.

양상블 지역 파랑예측시스템(Ensemble WAVEWATCH-III; EWW3)에서 사용된 모델은 3세대 파랑모델인 WAVEWATCH-III(ver2.22)이며, 에너지 입력 및 소산에 관한 물리과정은 Tolman and Chalikov(1996)을 사용하고 해저마찰에 의한 효

Table 1. Model description

Model code	WAVEWATCH-III (version 2.22)
Model coordinate	Spherical coordinate
Model domain	115°~150°E, 20°~50°N
Spatial resolution	1/12° (421 × 361)
Prediction & starting time	87 hour (00,12 UTC)
Initial data	-12 hour FCST
Input data	EPSG (UM N400 L70 M49) 10 m wind (24 members = 1 control + 23 perturbation)
Output data	Significant wave height, Mean wave length, Mean wave period, Mean wave direction etc
Wind wave data ensemble members	24

과는 JONSWAP 모수화(Hasselmann et al., 1973)를 사용하였다. 모델의 영역은 기상청에서 현업운영 중인 동북아시아 영역과 동일하게 설정하였으며 해양 수심격자 구성을 위하여 NGDC(National Geophysical Data Center)의 ETOPO2 전지구 수심자료가 사용되었으며, 고해상도 해안선 자료는 GSHHS(Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline) 자료를 이용하였다. EWW3의 공간해상도는 위·경도 동일한 1/12° 간격의 구면좌표계이며, 스펙트럼의 해상도는 최소진동수 0.0418 Hz에서 0.4114 Hz까지 25개의 파수를 가지며, 방향 해상도는 10° 간격으로 36개이다(Table 1). 입력장으로 사용되는 자료는 EPSG의 10 m 고도 해상풍 예측자료이며 파랑 모델의 격자에 맞게 선형내삽법을 사용하여 3시간 간격마다 자료가 입력된다. 양상블 멤버는 24개로 구성되었으며, EWW3에서의 섭동은 대기로부터 입력되는 해상풍 자료만 고려되었다. 각 멤버의 초기장은 12시간 전의 파랑 스펙트럼 예측장이며 같은 멤버의 cycle을 이용한다. ECMWF의 양상블 파랑예측시스템에서는 자료동화과정이 포함되어 있기 때문에 모든 멤버의 초기장은 control restart 파일을 이용하지만 본 시스템은 자료동화 과정이 포함되어 있지 않기 때문에 같은 멤버의 restart 파일을 초기장으로 사용함으로써 모델이 가지고 있는 너울 성분을 유지하였다(Bunney et al., 2012). 모델의 예측요소는 각 멤버별 유의파고, 유의파향, 파주기 등이며, Fig. 1은 EWW3의 운영 모식도로 EPSG이 수행된 후 해상풍 예측자료를 입력받아 EWW3가 수행되는 과정을 보여주고 있다.

양상블 파랑예측시스템의 성능을 비교하기 위해 사용된 자료는 기상청 현업 지역파랑예측시스템(단일모델)의 예측장이다. 이 시스템 역시 WAVEWATCH-III(ver4.18)로 구축되었으며, 모델의 영역은 동경 115~150도, 북위 20~50도이다. 파랑모델의 에너지 입력 및 소산에 관한 물리과정은 Ardhuin et al.(2010)이 제안한 WAM cycle4 패키지를 채택하였다. 파랑발달의 강제력으로 작용하는 해상풍은 기상청 지역예보모델의 3시간 간격의 예측자료이며 87시간까지 예측된다. 또한,

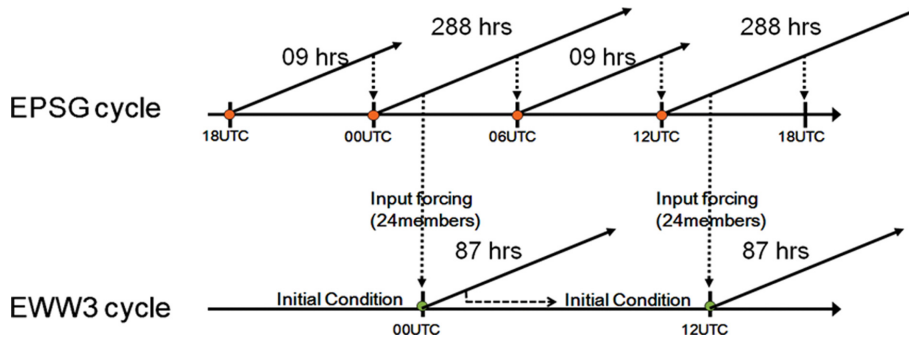


Fig. 1. System cycle of ensemble forecasting system for regional ocean wave.

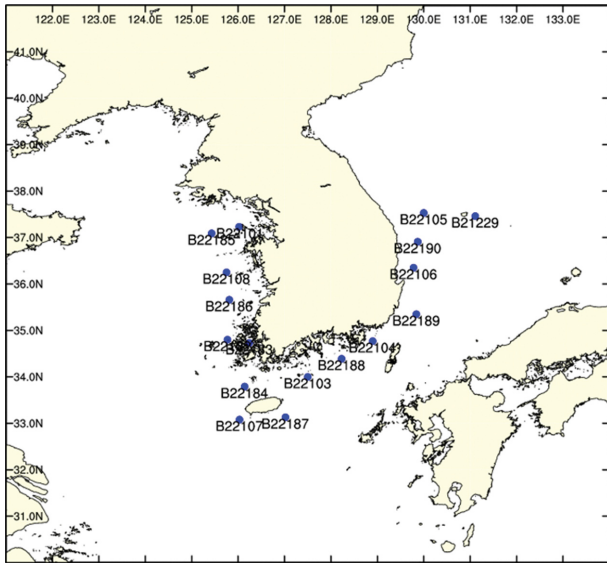


Fig. 2. Locations of KMA moored buoys used for model verification.

Table 2. KMA moored buoys

	ID number	Station	Lat.	Lon.
1	21229	Ulleungdo	37.45	131.11
2	22101	Deokjeokdo	37.23	126.01
3	22102	Chilbaldo	34.79	125.77
4	22103	Geomundo	34.00	127.50
5	22104	Geojedo	34.76	128.90
6	22105	Donghae	37.54	130.00
7	22106	Pohang	36.35	129.78
8	22107	Marado	33.08	126.03
9	22108	Oeyeondo	36.25	125.75
10	22183	Shinan	34.73	126.24
11	22184	Chujado	33.79	126.14
12	22185	Incheon	37.09	125.42
13	22186	Buan	35.65	125.81
14	22187	Seogwipo	33.12	127.02
15	22188	Tongyeong	34.39	128.22
16	22189	Ulsan	35.34	129.84
17	22190	Uljin	36.90	129.87

예측성 검증을 위해 기상청에서 운영하고 있는 17개 해양기상 부이 관측자료(Fig. 2, Table 2)를 사용하였다. 해양기상 부이는 풍향, 풍속, 유의파고, 파주기 등을 실시간으로 관측하며 매일 30분 간격으로 자료를 수집한다. 검증에 사용된 관

측요소는 유의파고이며, 기간은 2016년 7월부터 2017년 6월까지 1년 동안이다. 본 연구에서는 단일 모델과 앙상블 모델 각각의 파랑예측성능을 부이관측 자료와 직접 비교를 통하여 검증하였다.

3. 결 과

3.1 앙상블 예측결과

Fig. 3은 2016년 10월 4일 00 UTC의 24시간 예측시간에 대한 유의파고의 스탬프 맵이다. 스탬프 맵은 24개 멤버의 유의파고를 모두 표출한 것으로 각 멤버의 정보를 한눈에 확인할 수 있다. 스탬프 맵의 가장 상단에는 현업 단일모델의 예측 결과와 앙상블 모델의 예측 평균값을 함께 표출하여 단일 모델의 예측결과와 비교할 수 있도록 하였다. 2016년 제18호 태풍 차바(Chaba(1618))가 한반도의 남해안으로 지나갈 것으로 예측되며, 당시 단일모델 예측과 앙상블 모델의 예측장 평균 모두 남해안에서 매우 높은 파고가 예측되고 있는 것을 확인할 수 있다. 앙상블의 각 멤버별 특성을 보면, 24번 멤버의 경우 유의파고의 높이가 다소 낮게 예측된 반면, 12번 멤버의 경우 남해안 및 제주 전 해상에서 높은 유의파고를 예측하고 있어 멤버에 따라 다양한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 사례에 대한 스프레드(음영)와 스파게티(등치선)를 나타낸 것이다. 스프레드는 멤버들 사이의 표준편차로 앙상블 예측의 불확실성을 표현하고 스파게티는 특정 임계값의 분포도를 나타낸다. 대체로 스프레드가 큰 곳에서 스파게티도 넓게 분포한다. Fig. 5는 특정 임계값에 대한 확률 값을 나타낸 것으로 각 격자점에서 특정 임계값을 넘는 멤버가 N개라면 확률은 $N/24 \times 100(\%)$ 으로 계산된다.

3.2 앙상블 스프레드 개선

앙상블 예측시스템의 기본은 앙상블 스프레드가 적절히 퍼져나가 자연 상태를 설명할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 앙상블 스프레드를 평가하기 위하여 순위 히스토그램을 분석하였다. 순위 히스토그램은 검증방법은 아니나 앙상블 스프레드를 평가하는 진단도구이다(Anderson, 1996; Hamill

Stamp Map for Wave Height (m)

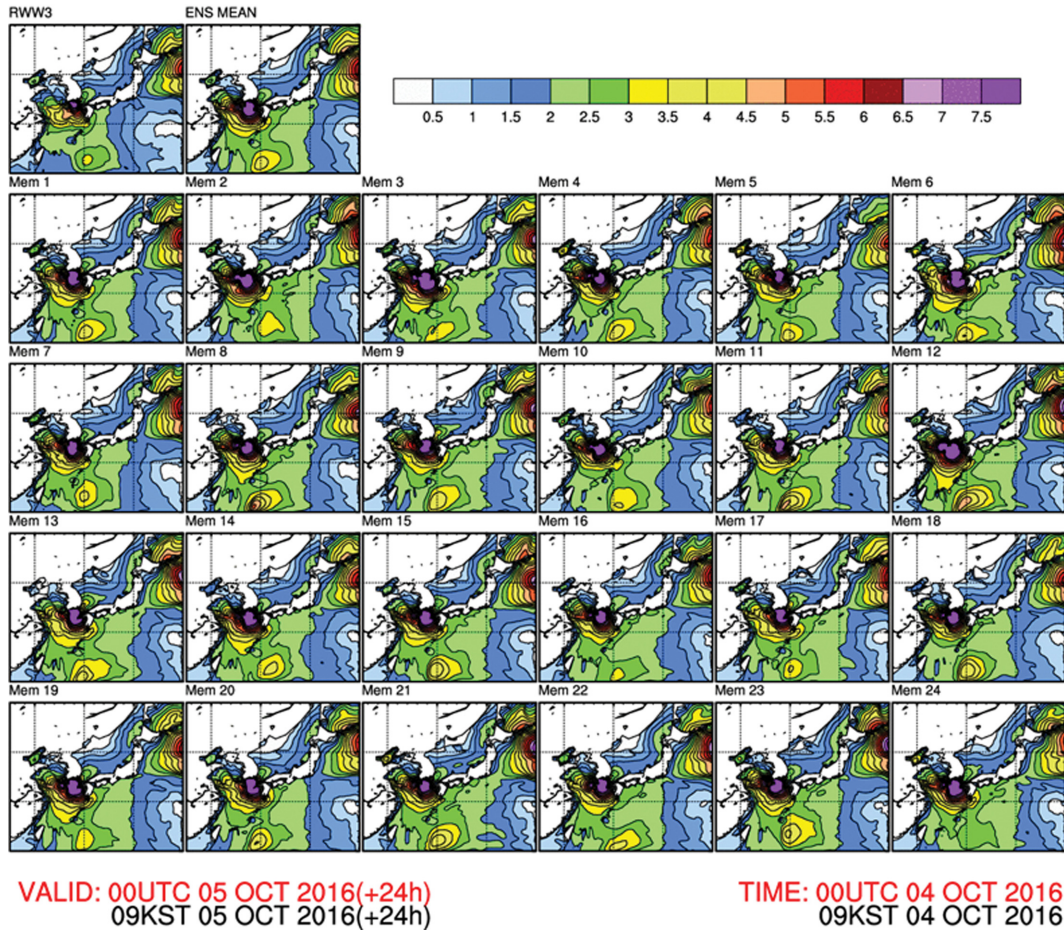


Fig. 3. Stamp map of SWH for 24 hr forecast hour Oct. 4, 2016.

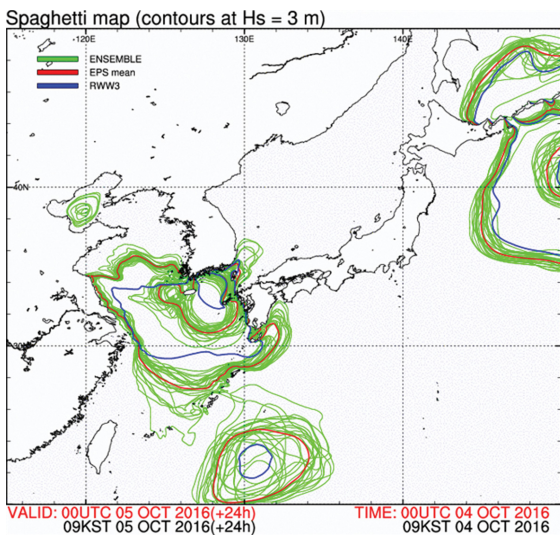


Fig. 4. Spaghetti and spread for threshold 3 m.

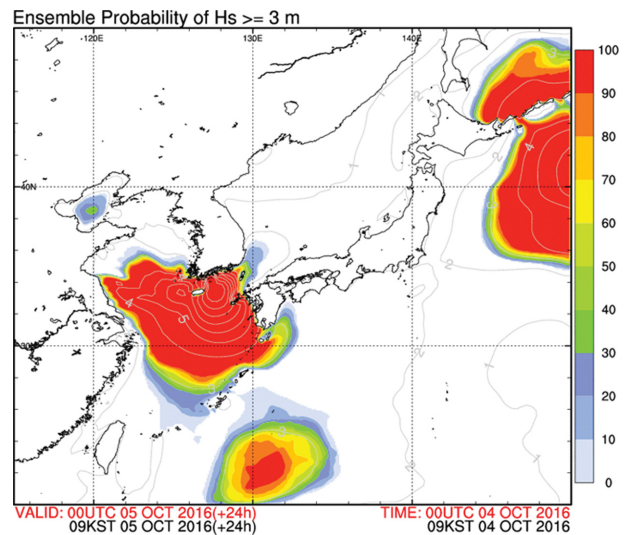


Fig. 5. Probability map of SWH for threshold 3 m.

and Colucci, 1996; Hamill and Colucci, 1997). 순위 히스토그램은 예측 양상블 멤버들을 크기순으로 나열하여 멤버수 $(N) + 1$ 의 구간을 설정하고, 관측 값을 해당 순위에 매칭을 한 후 값을 누적한 그래프이다. 관측 값이 각 구간에 속하는 확

률이 동일하다면 히스토그램은 이론적으로 평평한 모형을 보여야 한다. 만약 U자 형태를 나타낸다면 양상블 스프레드가 너무 넓음을 의미하고, 반대로 돔의 형태를 나타내면 양상블 스프레드가 좁게 분포함을 의미한다. 또한, 히스토그램이 한

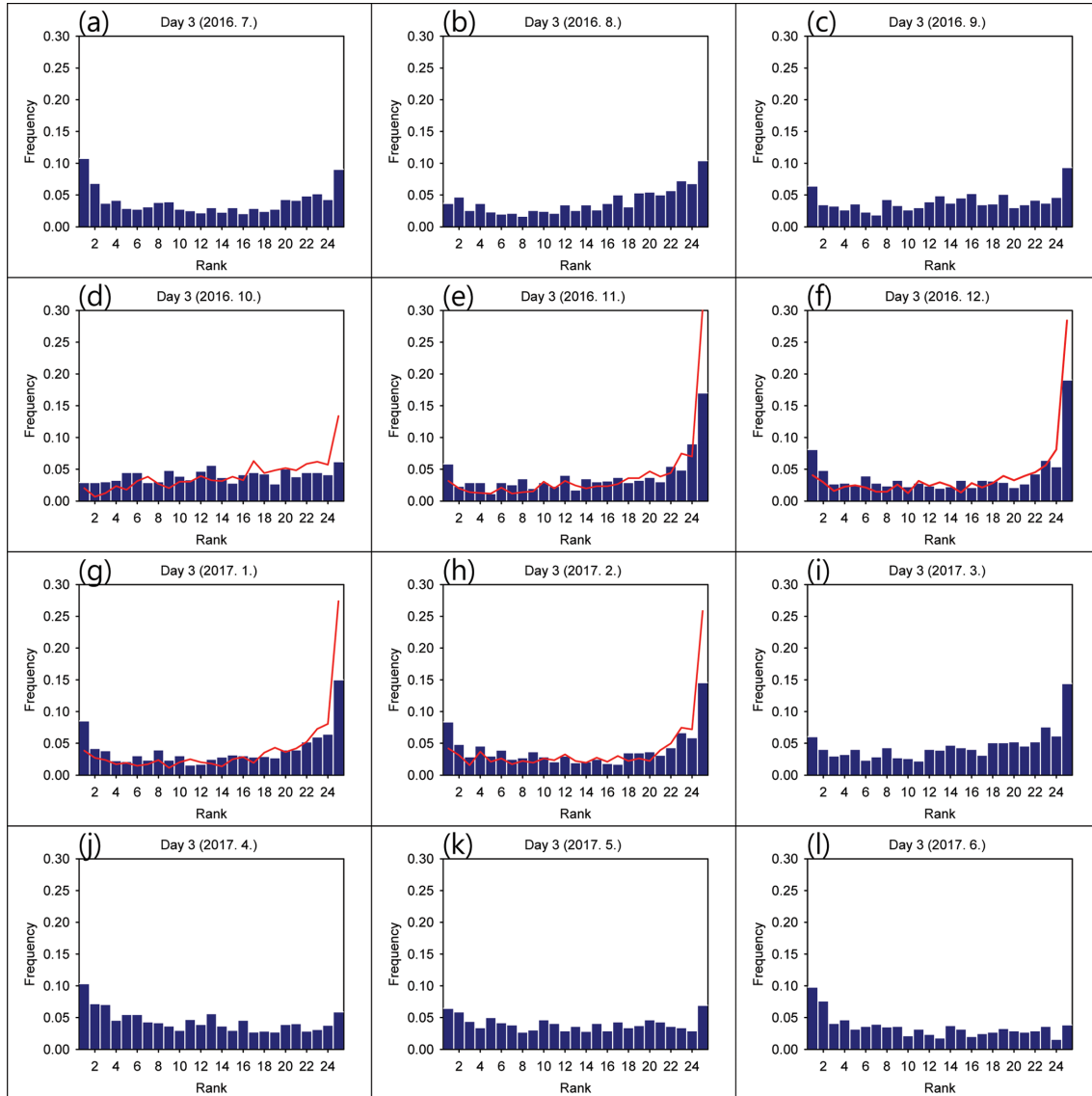


Fig. 6. Rank histogram plots for day 3 lead times. Red line shows raw ensemble.

쪽으로 기울어지는 형태를 보이면 스프레드에 편차가 있다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 양상블 파랑 스프레드의 순위 히스토그램을 나타낸 것으로 양상블 스프레드는 3일 예측자료를 사용하였다. 2016년 7월부터 9월까지 히스토그램(막대그래프)은 비교적 평평한 모형을 보이고 있어, 양상블 스프레드가 해상상태를 잘 모사한다고 볼 수 있다. 반면, 2016년 10월부터 2017년 2월까지의 히스토그램(붉은 실선)은 상위 순위로 집중되는 경향을 보이고 있다(Fig. 6(d)~(h)). 이러한 경향은 11월에 가장 큰 값을 보이고 있으며 모델에 편차가 있음을 의미한다. 즉 실제 해상상태보다 양상블 스프레드가 과소모의 하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 경향은 가을과 겨울철에 뚜렷이 나타났다. 이렇게 계절적으로 나타나는 편차를 보완하기 위하여 양상블 스프레드를 전체적으로 크게 모의할 수 있도록 파랑 모델에서의 계수에 대한 조정이 필요하다. Lee et al.(2009)는 파랑모델에서 예측정확도에 영향을 주는 8개의 물리계수

를 우선적으로 선정하였다. 선정된 계수는 파랑에너지 입력 소산 항에서 유효 해상풍계수(c_0), 비선형 파상호작용 항에서의 비례상수(C), 천해에서의 비선형 파상호작용을 계산하기 위해 사용되는 $\bar{k}d=0.75\hat{k}d$ 로, 여기서 \hat{k} 는 파수, d 는 평균 수심을 의미한다. 입력소산항에서 상대적으로 약한 바람이나, 반대방향의 바람에 의한 파의 감소효과를 나타내는 계수(X_s), 파-해저 상호작용 항에서의 경험상수(I), 마지막으로 모델 적 분시 사용되는 경험상수(X_p , X_r , X_f) 등이 있다. 선행연구에서는 c_0 , X_p , C 그리고 X_s 로 이루어진 계수의 조합이 전체 민감도의 99%를 차지함을 밝혔으며, c_0 의 경우 약 93% 이상의 민감도를 보여 8개의 물리계수 중에서 모델예측성에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. Park and Kang (2012)의 연구에서도 전지구 파랑예측모델의 예측성 개선을 위하여 최적의 유효 해상풍 계수를 선정하는 연구를 수행한 바 있다. Wang et al.(2017)의 연구에서는 TC96 물리과정에서 풍속을 조정하는 계수는 매우 민감하며, 특정해역에 대

해서 WW3 모델을 적용하기 전에 계수값의 보정이 필요함을 언급하였다.

본 연구에서도 파랑모델의 에너지 입력 및 소산에 관한 물리과정 중에서 Tolman and Chalikov(1996) 방안을 채택하고 있으며, 해상풍의 경우, 유효 해상풍 계수를 사용하여 입력되는 해상풍을 최적화하고 있다. 식(1)은 파랑모델 내에서 실제 해상풍(U_{10}) 대신에 사용되고 있는 유효 해상풍(U_e)을 나타내고 있다.

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

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

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

$$ST = \frac{hg(T_a - T_s)}{U_h^2 T_0}$$

위 식(1)에서 ST 는 주요 안정도 계수이고, T_a , T_s 그리고 T_0 는 각각 대기, 해양 그리고 참고 온도를 의미한다. h 는 해상풍과 대기 온도의 참고 높이를 나타내고, $f_1 \leq 0$ 일 경우, c_1 과 c_2 는 서로 반대 부호를 나타내며, $f_2 = f_1 c_1 / c_2$ 이다. g 는 중력가속도, U_h 는 참고 높이에서의 풍속을 나타낸다. 기본적으로 모델에서는 $c_1 = -0.1$, $c_2 = 0.1$, $f_1 = -150$ 그리고 $ST_0 = -0.01$ 로 설정되어 있다. 결국 식(1)에서 유효 해상풍 계수(이하 c_0)를 조절함으로써 대기모델의 해상풍에 의해서 파랑 변수에 특별한 편차 경향을 보일 때 편차를 보정하는 역할을 할 수 있다. 최적의 계수를 선정하기 위하여 Lee et al.(2009)의 연구에서 적용한 방법을 사용하였으며, 그 방법은 설정된 c_0 값에 $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, 그리고 $\pm 50\%$ 비율을 적용하여 c_0 를 재산정한 후 모델을 수행하여 가장 예측성능이 좋은 계수를 선정한다. 본 연구에서 기본적으로 설정된 c_0 는 1.6이고 유의파고의 과소모의 경향을 보정하기 위하여 $+10\%$ 비율을 적용한 $c_0 = 1.8$ 으로 조정하여 모델을 재수행하였으며 그 결과를 막대그래프로 표현하였다. 계수를 보정하기 전에 상위 순

위로 치우쳐 있던 경향이 다른 순위로 골고루 분포하는 것을 확인하였고, 이것은 계수 조정을 통한 계절적인 모델의 편차가 보정된 것을 의미한다.

3.3 제곱근 오차(Root Mean Squared Error; RMSE)와 스프레드(Spread)

양상블 예측의 목적 중 하나는 양상블 멤버(하나 또는 여러 개 멤버의 조합)가 실제 해상 상태를 대표할 수 있다고 기대하는 것이다. 따라서 양상블 예측시스템에서의 기초적인 검증요소는 양상블 평균과 양상블 스프레드를 비교하는 것이다. RMSE는 식(2)과 같이 양상블 평균과 실제 값(본 연구에서는 관측자료)의 차이를 제곱근한 값이고 스프레드는 양상블 평균에 대한 각 양상블 멤버들의 표준편차이다(식 3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M (\tilde{f}_i - o_i)^2} \quad (2)$$

$$SPREAD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tilde{f} - f(i))^2} \quad (3)$$

식(2)에서 \tilde{f} 는 양상블 평균 값, o 는 관측값을 나타내고 M 은 모델의 격자수를 나타낸다. 식(3)에서 \tilde{f} 는 양상블 평균 값, f 는 i 번째 멤버의 예보값, N 은 양상블 멤버 수를 의미한다. 양상블 멤버의 수가 무한하다고 가정하면, 양상블 멤버들의 스프레드와 양상블 평균과 실제 해상상태의 차이는 같아야 한다. 다만, Barker(1991)는 양상블 멤버수가 무한대로 커진다고 해도 RMSE와 스프레드의 상관성이 항상 높은 것은 아님을 언급하며, 다만 상관성이 낮아도 양상블 정보는 가지고 있다고 밝혔다.

Fig. 7은 분석기간 동안의 유의파고에 대한 예측시간별 양상블 예보평균 오차와 스프레드를 나타낸 것으로 각각 초기 시간(a)과 3일 예측(b)의 분석결과이다. 그림 안의 히스토그램은 스프레드를 각 0.2 m 간격으로 나누어 각 구간에 해당

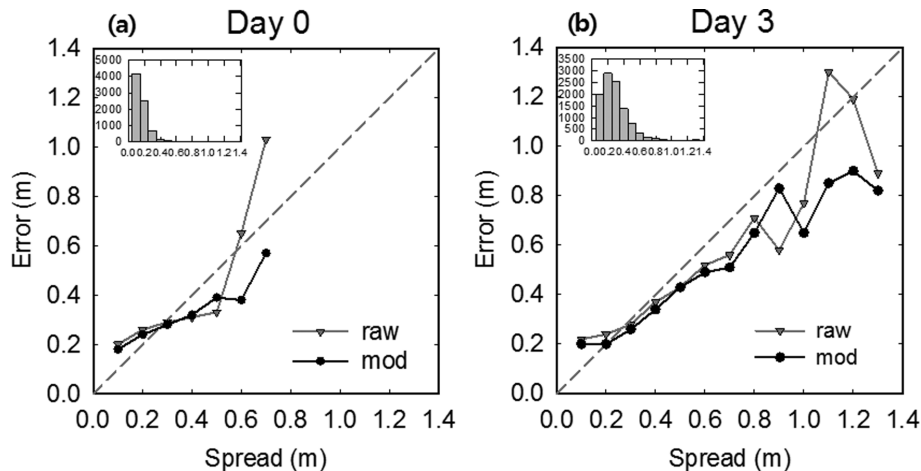


Fig. 7. Spread/skill relationship of the significant wave heights for (a) day 0 lead time and (b) day 3 lead time. Inset histogram shows populations in each spread bin.

되는 스프레드의 빈도수를 나타낸 것이다. Barker(1991)에 의하면 초기 예측시간에서는 RMSE와 스프레드의 상관성이 높고 예보시간이 길어질수록 점차 상관성이 낮아진다고 밝혔지만, 본 연구에서는 단기예측의 결과만을 보여주기 때문에 예보시간의 크기에 따른 상관성의 차이가 크게 나타나지는 않았다. 그래프가 대각선에 일치할수록 앙상블 스프레드가 해상상황을 잘 표현함을 의미하며 검은 선은 앙상블 스프레드를 개선한 후이고, 회색선은 개선전의 결과이다.

RMSE와 스프레드의 일치성을 확인하기 위하여 스프레드가 1 m 이하인 경우의 RMSE와 스프레드의 차를 분석하였다. 앙상블 스프레드를 개선하기 전과 후 평균 차이 값이 각각 0.10 m와 0.08 m로 나타났으며, 앙상블 스프레드를 개선함으로써 약 13% 이상으로 일치성이 향상됨을 확인하였다. 초기시간보다 3일 예측에서 예측오차가 크게 나타나고 전체 빈도수의 약 99%를 차지하는 0.8 m 이하에서 대각선과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 예측유의과고 1 m 이상에서는 대각선과 다소 멀어지는 경향을 보이고 있는데, 이 구간은 전체 빈도수의 약 0.94%를 차지하기 때문에 그 대표성은 현저히 떨어지지만 특정 사례의 결과가 표현된 것으로 해석된다. 전반적으로 확률예보를 위한 앙상블 스프레드가 실제 해상상태를 표현하는 데 보다 안정적인 것을 확인할 수 있고, 또한 스프레드를 개선함으로써 오차의 변동 폭에 있어서

급격한 증가 또는 감소하는 경향 없이 점진적으로 증가하는 것으로 보아 이 앙상블예측시스템의 안정성 역시 향상된 것을 확인할 수 있다.

3.4 앙상블 모델의 예측성과와 확률 검증

해상예보의 가이드를 제공을 위하여 앙상블 예보에 대한 검증은 수행하였다. 비교대상은 단일모델의 예측결과와 앙상블 예측의 평균자료이며 앙상블 평균자료는 24개 멤버를 산술평균한 값이다. Fig. 8은 예보시간에 따른 앙상블 예측평균과 단일모델의 예측결과의 RMSE와 편차를 나타낸 것이다. 검은 색 막대는 단일모델의 예측결과이고 밝은 회색은 스프레드를 개선하기 전의 앙상블 예측 평균의 결과이며, 어두운 회색은 스프레드를 개선한 후의 앙상블 예측 평균의 결과이다. Fig. 8(a)~(b)는 전체 분석기간 동안의 결과이며, Fig. 8(c)~(d)는 태풍 등 위험해양 기상시의 모델의 예측성능을 알아보기 위하여 2016년 제18호 태풍 ‘차바(Chaba)’ 사례 기간 동안의 결과를 나타낸 것이다. 참고로, 태풍 차바(1618)는 2016년 9월 28일 03시에 태풍으로 발생하였고, 중심기압 930 hPa, 최대풍속 50 m/s까지 발달하였다. 10월 5일 03시 955 hPa의 세력을 유지하면서 서귀포 남남서쪽 약 50 km 부근해상까지 북상하였으며 2016년 10월 5일 09시에 여수 동남동쪽 약 40 km 부근해상을 지나 동해안으로 빠르게 이동하여 2016년 10

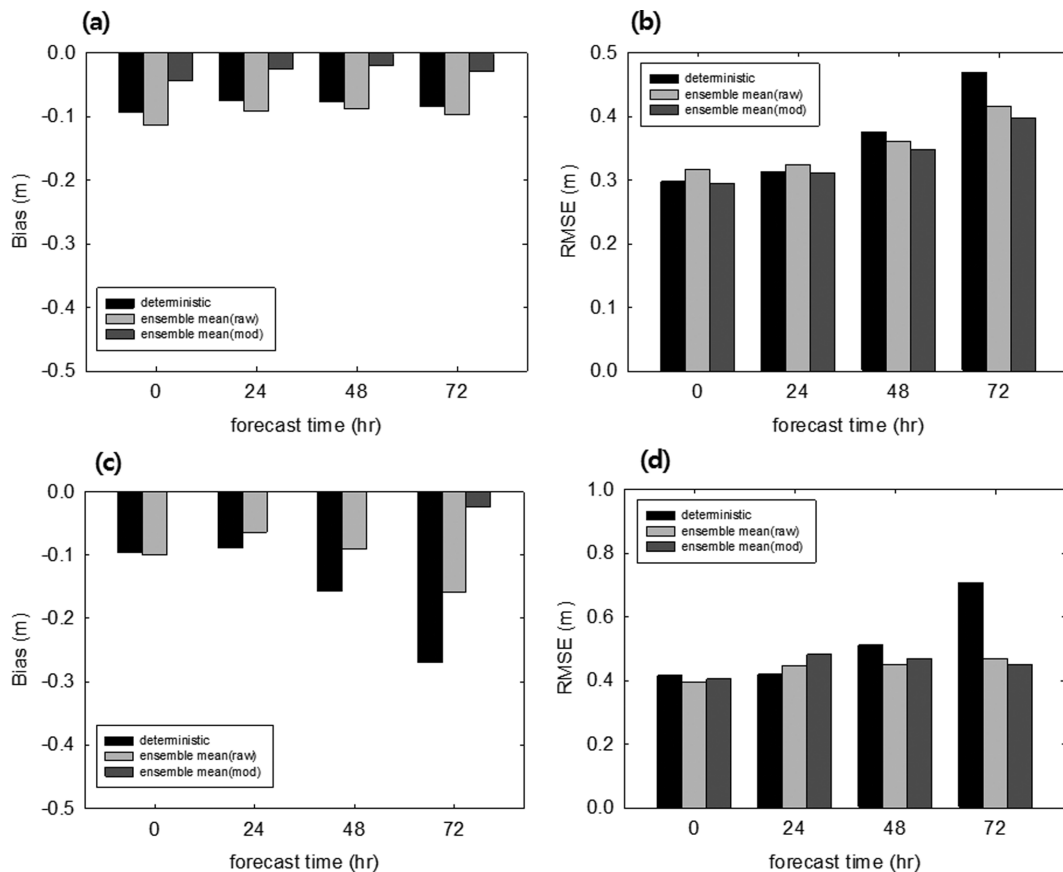


Fig. 8. (a) Bias and (b) RMSE variation of significant wave heights for 00, 24, 48, 72 hours forecasting between ocean buoy observation and deterministic forecast and ensemble mean forecast. (c) Bias and (d) RMSE for Typhoon Chaba (1618) case.

월 6일 06시에 온대저기압으로 변질되었다.

양상블 스프레드를 개선하기 전에는 단일모델의 예측에 비하여 과소 모의하는 경향이 매우 크게 나타났으나, 개선 후에는 편차가 크게 감소하여 대부분의 예측시간에서 편차가 0에 가깝게 개선되었다. 즉, 가을과 겨울철에 나타난 계절적인 편차를 보정하면서 편차에서 많은 개선이 이루어진 것으로 판단된다. RMSE의 경우에도 단일예보의 예측에 비하여 스프레드가 개선되면서 전체 예측시간에 대하여 양상블 예측의 성

능이 향상된 것을 확인할 수 있다. 특히, 2일 예측시간 이후에는 양상블 예측평균이 단일예보의 예측에 비하여 RMSE가 크게 감소한 것을 확인할 수 있는데, 이것은 예보시간이 길어지면서 수치모델의 불확실성이 커지게 되는데, 이러한 불확실성이 예측결과에 반영된 것으로 판단된다. 또한, 태풍 차바(1618)의 경우에도 단일 모델예측에 비하여 편차가 작았으며, 특히 3일 예측에서는 단일모델보다 약 36% 정도 예측능이 향상된 결과를 보였다.

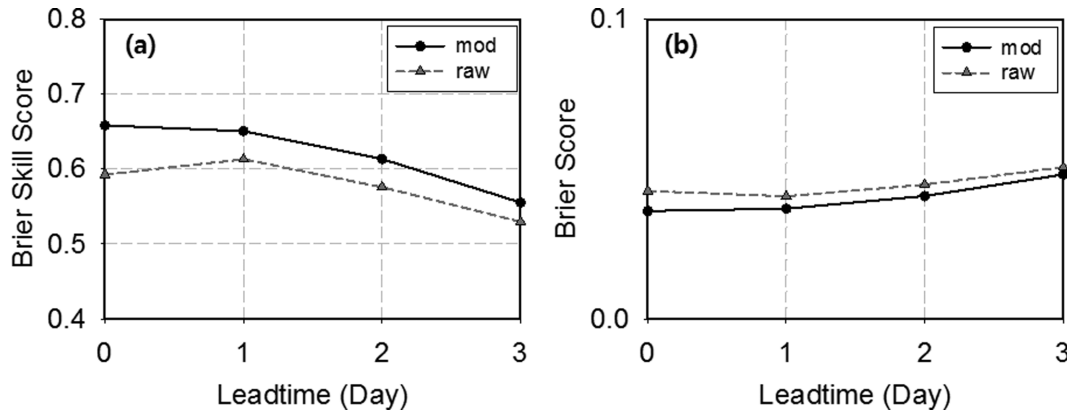


Fig. 9. (a) Brier skill scores and (b) Brier scores for significant wave height higher than 2 m. Solid lines shows corrected ensemble and Dash lines shows raw ensemble.

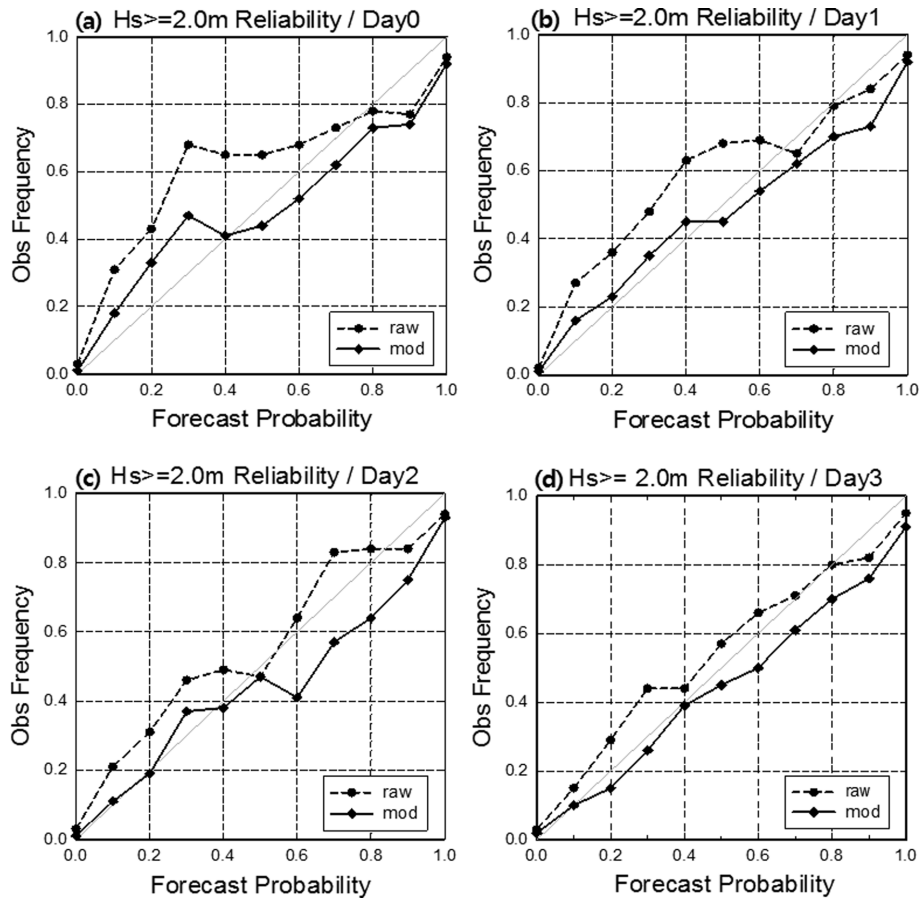


Fig. 10. Significant wave height reliability plots for (a) day 0 lead time, (b) day 1 lead time, (c) day 2 lead time and (d) day 3 lead time. Threshold is 2 m. Dash and solid lines show the ensemble and corrected ensemble, respectively.

양상블 파랑예측 자료를 확률예보에 활용하기 위한 확률 예측성을 검증하였다. 검증 변수는 Brier Score(BS), Brier Skill score(BSS), 신뢰도 다이어그램, Relative operation characteristic(ROC)이다. BS는 확률예측 정확도를 측정하는데 이용되며, 예측평균과 관측평균 사이의 관계인 신뢰도, 편별력, 그리고 불확실성으로 나뉜다. BS가 0 가가울수록 완벽한 예측을 의미한다. BSS는 확률예측 score로 사용되며 기후자료, 다른 확률예측자료 그리고 현업자료 등 참조된 자료의 BS와의 score를 나타낸다. BSS가 1을 나타낼 경우 완벽한 예보를 의미한다. 신뢰도 다이어그램은 양상블 예측의 신뢰 관계를 나타낸다. 그래프가 대각선과 일치할수록 예보확률의 신뢰도가 높음을 의미하고 대각선 아래에 위치할 경우 실제 발생확률에 비하여 많이 발생하는 경향을 나타내고, 대각선보다 위에 위치할 경우 확률예보가 과소모의 함을 의미한다. ROC는 특정 임계값을 설정하여 확률예보에서 얼마나 잘 감지하는지 판단하는 지수로 양상블 확률예보의 성능을 평가하는 방법으로 이용된다. 예보가 완벽하다면 ROC 면적은 1이고 ROC 면적이 0.5일 경우, 즉 대각선 아래에 위치할 경우 예보의 가치가 없다고 판단한다. 기상청의 풍랑관련 특보 발

표기준은 해상에서 풍속이 14 m/s 이상이 3시간 이상 지속되거나 유의파고가 3 m 이상이 예상될 때이다. 본 연구에서는 위험 해양기상의 선제적인 정보를 제공하고자 유의파고 2 m에 대한 확률예측 검증을 수행하였다.

Fig. 9는 예측 유의파고 2 m 이상에 대한 BSS와 BS를 나타낸 것이다. 예측 시간이 길어질수록 BSS가 커지고 있으며 양상블 스프레드에 대한 보정 전보다 보정 후의 결과가 1의 값에 더 가까워 좀 더 완벽한 예보값을 보이고 있다. BS의 경우도 BSS와 비슷한 경향을 나타내며 예보시간이 길어질수록 BS 값이 커지고, 보정된 양상블 스프레드의 BS 결과가 0에 가까운 경향을 보이고 있다. Fig. 10은 예측 유의파고 2 m 이상에 대한 신뢰도 다이어그램을 분석한 결과이다. 파선은 양상블 스프레드를 개선하기 전의 검증결과이고, 실선은 양상블 스프레드를 개선한 후의 검증결과이다. 초기시간의 전체 예측확률이 실제 확률보다 과소 모의하는 경향이 뚜렷이 나타난다. 스프레드가 개선된 후 50% 이하의 낮은 확률구간에서 과소모의 경향이 다소 완화되었고, 높은 확률구간에서는 다소 과대 모의하는 경향을 보이고 있다(Fig. 9(a)). 1일 예측시간에서는 스프레드가 개선되면서 대각선과 일치하

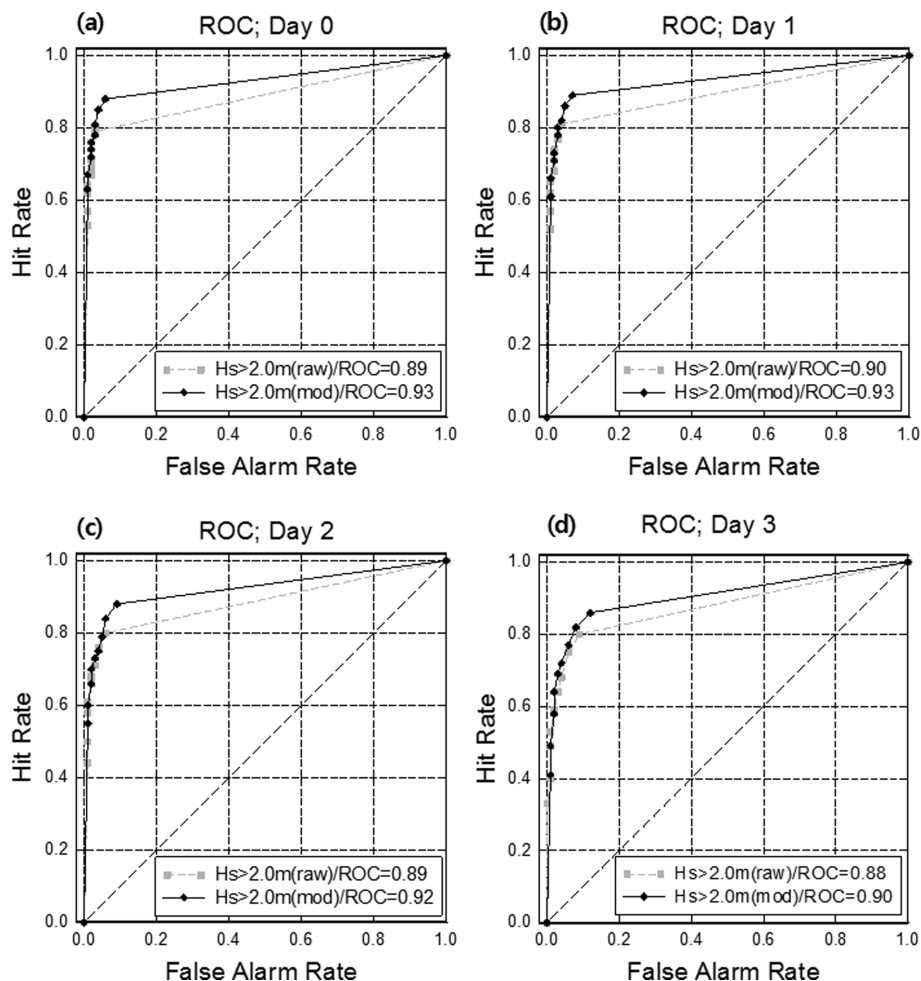


Fig. 11. Significant wave height ROC plots for (a) day 0 lead time, (b) day 1 lead time, (c) day 2 lead time and (d) day 3 lead time. Gray and black lines show the ensemble and corrected ensemble, respectively.

는 경향을 보여 실제 확률과 유사한 결과를 보였다. 2일 예측에서는 60% 이상의 높은 확률구간에서 과대 모의하는 경향이 뚜렷하여 예측확률이 다소 떨어지는 경향을 보였으며, 3일 예측에서는 대각선과 비교적 잘 일치하고 있어 단기예측에서보다 예측시간이 길어질수록 신뢰도가 향상된 결과를 보이고 있다.

Fig. 11은 예측 유의파고 2 m 이상에 대한 예측시간별 ROC 곡선을 나타낸 것이다. ROC 곡선은 대체로 좌측상단에 위치하고 있어 확률예측의 성능이 우수함을 보이고 있으며 예보시간이 길어질수록 좌측하단으로 다소 치우치는 경향을 보이고 있다. 양상블 스프레드를 개선하기 전에는 ROC 면적이 0.9 이하를 나타냈지만, 스프레드에 대한 보정이 수행되면서 ROC 면적이 모든 예측시간에서 0.9 이상을 보였다. 특히, 3일 예측의 경우 양상블 스프레드를 개선하면서 ROC 면적의 크기가 0.88에서 0.9로 상승하였고, 이것은 파랑 발생 확률에 대한 예측성능이 향상됨을 의미한다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 우리나라 주변 해역에서의 양상블 파랑예측 시스템을 구축하였으며 양상블 기반 확률예측에 대한 성능을 검증하였다. 양상블 스프레드의 순위 히스토그램 분석을 통하여 파랑모델에서 나타나는 계절적인 편차를 보정하였으며, 양상블 예보오차와 양상블 멤버들의 스프레드가 비슷한 경향을 보이고 있어 확률예측시스템 구축은 잘 된 것으로 판단된다. 검증에 사용된 자료는 기상청에서 운영 중인 17개의 부이관측 자료이며 기간은 2016년 7월부터 2017년 6월까지 1년 동안이다. 단일예측의 성능을 알아보기 위하여 현업 단일 파랑예측 결과와 유의파고 양상블 평균에 대하여 RMSE와 편차를 분석하였다. 양상블 평균의 RMSE는 단일예측에 비하여 향상된 결과를 보이고 있으며, 특히 2일 예보 이후에는 그 경향이 뚜렷이 나타났다. 이것은 수치모델의 불확실성이 양상블 기법을 통하여 모델에 반영되고 예측정확도 향상에 기여한 것으로 보인다. 예측 유의파고 2 m에 대한 확률검증에서, ROC 영역이 전체 예측시간에 대하여 0.9 이상을 보여 확률예측의 성능이 뛰어나고, 이러한 양상블 파랑예측 결과가 확률예보에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되었다. 향후 2020년에 기상청에서 영향예보가 시행됨에 따라 해상 영향예보 의사결정 지원에 필요한 가이드스 개발에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발」 “해양기상기술 지원 및 활용연구(KMA2018-00421)”의 지원으로 수행되었습니다. 또한, 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 세 분의 심사위원분들께 감사를 드립니다.

References

- Anderson, J.L. (1996). A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations. *Journal of Climate*, 9(7), 1518-1530.
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., Westhuysen, A., Queffelecoul, P., Lefevre, J.-M., Aouf, L. and Collard, F. (2010). Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40(9), 1917-1941.
- Barker, T.W. (1991). The relationship between spread and forecast error in extended-range forecasts. *Journal of Climate*, 4(7), 733-742.
- Berner, J., Shutts, G.J., Leutbecher, M. and Palmer, T.N. (2009). A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(3), 603-626.
- Buizza, R., Houtekamer, P.L., Pellerin, G., Toth, Z., Zhu, Y. and Wei, M. (2005). A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1076-1097.
- Bunney, C.C., Li, J.-G. and Saulter, A. (2012). Met Office Wave Model ensemble Prediction Systems in the ‘Atlantic-Euro Zone’, MyWave Report D3.1. December 2012. Met Office, U.K.
- Bunney, C. and Saulter, A. (2015). An ensemble forecast system for prediction of Atlantic and UK wind waves. *Ocean Modelling*, 96, 103-116.
- Cao, D., Tolman, H.L., Chen, H.S., Chawla, A. and Gerald, V.M. (2009). Performance of the ocean wave ensemble forecast system at NCEP. In *The 11th International Workshop on Wave Hindcasting & Forecasting and 2nd Coastal Hazards Symposium*.
- Flowerdew, J., Horsburgh, K., Wilson, C. and Mylne, K. (2010). Development and evaluation of an ensemble forecasting system for coastal storm surges. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(651), 1444-1456.
- Hamill, T.M. and Colucci, S.J. (1996). Random and systematic error in NMC’s short-range Eta ensembles. In *Preprints, 13th Conf. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences*, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 51-56.
- Hamill, T.M. and Colucci, S.J. (1997). Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 125(6), 1312-1327.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, 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). *Erganzungsheft* 8-12.
- Lee, B.C., Fan, Y.M., Chuang, L.Z.H. and Kao, C.C. (2009). Para-

- metric sensitivity analysis of the WAVEWATCH III model. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 20(2).
- Moon, I.-J. and Oh, I.S. (2003). A study on the effect of waves and tides on storm surge using a coupled ocean wave-circulation model. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 39(5), 563-574 (in Korean).
- Palmer, T.N. (2001). A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-dynamic parametrization in weather and climate prediction models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(572), 279-304.
- Park, J.S. and Kang, K.R. (2012). Sensitivity analysis of global wind-wave model. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(5), 333-342 (in Korean).
- Saetra, Ø. and Bidlot, J.R. (2004). Potential benefits of using probabilistic forecasts for waves and marine winds based on the ECMWF ensemble prediction system. *Weather and Forecasting*, 19(4), 673-689.
- Tolman, H.L. and Chalikov, D. (1996). Source terms in a third-generation wind wave model. *Journal of Physical Oceanography*, 26(11), 2497-2518.
- You, S.H. and Park, J.S. (2010). Research on wind waves characteristics by comparison of regional wind wave prediction system and ocean buoy data. *J. of Korean Society of Ocean Engineers*, 24(6), 7-15 (in Korean).
- Wang, J., Zhang, J., Yang, J., Bao, W., Wu, G. and Ren, Q. (2017). An evaluation of input/dissipation terms in WAVEWATCH III using in situ and satellite significant wave height data in the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(3), 20-25.

Received 4 April, 2018

Revised 18 April, 2018

Accepted 18 April, 2018