

풍력예보를 위한 단순 앙상블예측시스템 - 태풍 볼라벤 사례를 통한 평가 -

A Simple Ensemble Prediction System for Wind Power Forecasting - Evaluation by Typhoon Bolaven Case -

김진영* · 김현구**† · 강용혁* · 윤창열* · 김지영*** · 이준신***
Kim Jin-Young*, Kim Hyun-Goo**†, Kang Yong-Heack*,
Yun Chang-Yeol*, Kim Ji-Young*** and Lee Jun-Shin***

(Received 24 December 2015; accepted 15 February 2016)

Abstract : A simple but practical Ensemble Prediction System(EPS) for wind power forecasting was developed and evaluated using the measurement of the offshore meteorological tower, HeMOSU-1(Herald of Meteorological and Oceanographic Special Unite-1) installed at the Southwest Offshore in South Korea. The EPS developed by the Korea Institute of Energy Research is based on a simple ensemble mean of two Numerical Weather Prediction(NWP) models, WRF-NMM and WRF-ARW. In addition, the Kalman Filter is applied for real-time quality improvement of wind ensembles. All forecasts with EPS were analyzed in comparison with the HeMOSU-1 measurements at 97 m above sea level during Typhoon Bolaven episode in August 2012. The results indicate that EPS was in the best agreement with the in-situ measurement regarding (peak) wind speed and cut-out speed incidence. The RMSE of wind speed was 1.44 m/s while the incidence time lag of cut-out wind speed was 0 hour, which means that the EPS properly predicted a development and its movement. The duration of cut-out wind speed period by the EPS was also acceptable. This study is anticipated to provide a useful quantitative guide and information for a large-scale offshore wind farm operation in the decision making of wind turbine control especially during a typhoon episode.

Key Words : 풍력예보(Wind power forecasting), 앙상블예측시스템(EPS; Ensemble Prediction System), 수치기상예측(NWP; Numerical Weather Prediction), 칼만필터(KF; Kalman Filter), 태풍 볼라벤(Typhoon Bolaven), 해모수 1호(HeMOSU-1; Herald of Meteorological and Oceanographic Special Unit-1)

**† 김현구(교신저자) : 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터

E-mail : hyungoo@kier.re.kr, Tel : 042-860-3376

*김진영, 강용혁, 윤창열 : 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터

***김지영, 이준신 : 한국전력공사 전력연구원

**† Kim Hyun-Goo (corresponding author) : New & Renewable Energy Resource Center, Korean Institute of Energy Research.
E-mail : hyungoo@kier.re.kr, Tel : 042-860-3376

*Kim Jin-Young, Kang Yong-Heack, Yun Chang-Yeol : New & Renewable Energy Resource Center, Korean Institute of Energy Research.

***Kim Ji-Young, Lee Jun-Shin : Korea Electric Power Research Institute

1. 서 론

최근 전세계적으로 풍력발전 기술개발과 보급이 가속화됨에 따라 유럽을 필두로 세계 각국은 경쟁적으로 풍력에너지 보급목표를 상향조정하고 있다.¹⁾ 예를 들어, 미국은 탄소배출저감을 위한 청정전력계획(Clean Power Plan)을 통하여 풍력을 포함한 재생에너지에 의한 전력생산 비율을 2030년까지 28%로 6%p 상향조정하였고,²⁾ 우리나라도 제4차 신재생에너지기본계획을 통하여 2035년까지 신재생에너지 발전비율을 18.2%로 5.6%p 상향조정하였다.³⁾ 산업통상자원부는 상향조정된 풍력에너지 보급목표 달성을 위해 풍력자원지도를 이용한 입지분석을 통하여 유망후보지를 선정하고, 풍력발전 실증발전단지 건설을 통한 종합추진계획을 수립해오고 있으며, 특히 환경규제가 심한 육상에서 벗어나 서남해상 2.5 GW 해상풍력실증사업을 시작으로 해상풍력 개발을 추진하고 있다.⁴⁾

참고로 한국에너지기술연구원 신재생에너지자원센터에서 공공데이터로서 서비스하는 풍력자원지도는⁵⁾ 풍력자원의 장기간 변동성을 파악하기 위하여 매년 업데이트를 실시하고 있으며,⁶⁾ 해상영역에 대해서는 SAR (Synthetic Aperture Radar) 위성영상을 이용하여 해상풍의 예측정확도를 검증하였다.⁷⁾ 또한 해외에서 제작한 상업용 풍력자원지도 대비 우수한 정확도를 보임을 정량적 비교분석을 통하여 확인하였다.⁸⁾(Fig. 1 참조)

일반적으로 풍력터빈은 구조적 안전성을 유지하기 위해 25 m/s 이상의 정지풍속(cut-out wind speed)이 감지되면 더 이상 블레이드에서 양력이 발생하지 않도록 즉시 피치각을 변경하여 페더링(feathering)을 하고 브레이크를 잠아서 운전을 정지한다. 그러나 이 경우 상당

한 발전의 기회를 상실하는 것이므로, 최근에 ENERCON 등 풍력터빈 제작사가 정지풍속에서 즉각 운전을 정지하는 것이 아니라 피치각을 제어하여 서서히 발전량을 줄여나가다가 풍속이 정지풍속이하로 복귀하면 정상발전모드로 전환함으로써 출력을 최대화하는 제어기술을 채택하고 있다.⁹⁾ 그러나 태풍 내습 제어시점을 잘못 선택할 경우, 2013년 태풍 우사기 내습시 중국 광둥 산웨이 풍력단지의 풍력터빈 25기중 8기의 블레이드가 부러지고 13기가 막대한 피해를 입은 것과 유사한 상황이 올 수 있다.¹⁰⁾

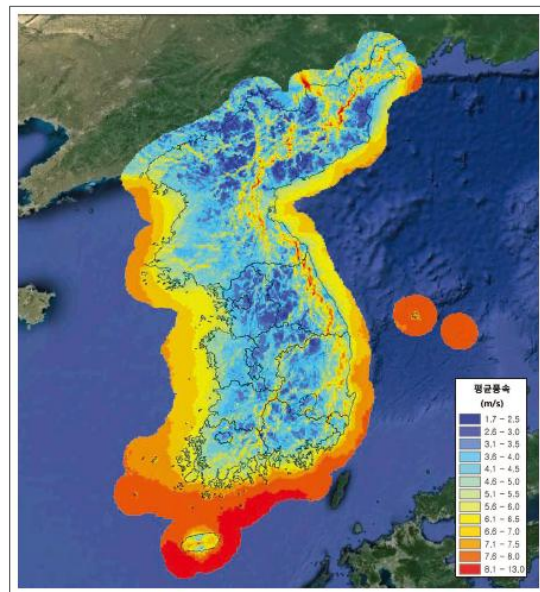


Fig. 1 Wind resource map for average wind speed at 80 m above ground level.

우리나라에 영향을 미치는 태풍은 연평균 2~3개 정도인데, 최근 기후변화에 따라 북태평양 고기압이 남북으로 밀리면서 중국지역으로 가로지르던 태풍의 경로가 서해로 발달하고 있으며, 해수면 온도 상승에 따라 태풍 발생빈도가 증가하여 태풍 강도가 강해지는 경

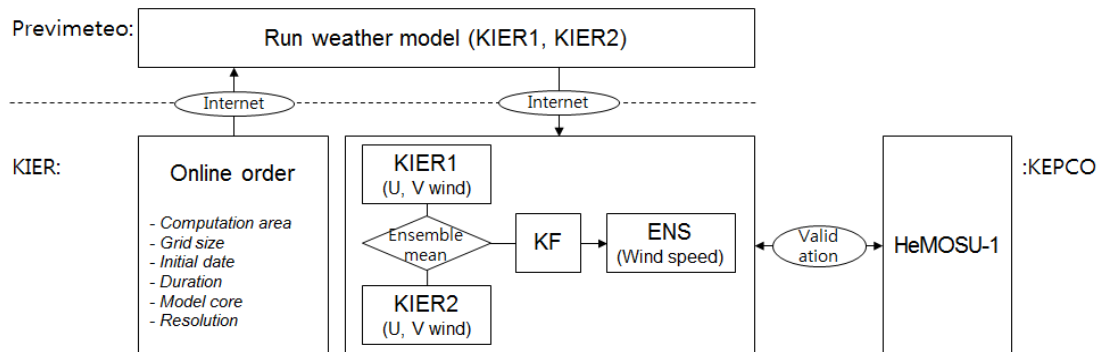


Fig. 2 Schematic diagram of the KIER's Ensemble Prediction System.

향이 있다.^{11),12),13)} 따라서 향후 서남해상에 대규모 해상풍력단지의 운영을 위해서는 풍력자원의 장기적인 변화특성을 지속적으로 모니터링하고, 태풍 내습 상황을 대비하여 신뢰성 있는 풍력발전 예보체계를 사전에 개발하여야 할 필요가 있다.

그러나 우리나라의 풍력예보 관련 연구논문은 2006년 이후 발표되기 시작하였으나 소수에 불과하며, 그 대부분 통계모형에 의한 단기간 예보를 다루고 있다.^{14),15),16)} 현재 현업예보에서는 수치기상예측 모형에 의한 장기간 예보의 불확도 감쇄를 위하여 다중모형을 이용한 앙상블예측시스템(EPS)을 사용하는 추세이다.¹⁷⁾ 앙상블예측은 독립적인 초기조건, 경계조건 또는 물리과정을 다수 조합함으로써 단일예측이 가지는 결정론적 예측의 한계를 보완하여 확률론적 예측을 하는 방법이다.

본 연구는 풍력발전 사업자가 합리적인 비용으로 운용할 수 있는 수준의 실용적인 단순 앙상블예측시스템을 제안하고, 서남해 해상풍력단지 예정지를 통과한 태풍 볼라벤(Bolaven) 사례에 대하여 예측성능을 평가하고자 한다. 앙상블예측시스템의 검증에 위한 실측자료로는 실증단지에 설치된 해상기상탑 해모수 1호(HeMOSU-1)의 측정자료를 이용하였다.¹⁸⁾

2. 연구자료 및 방법

2.1 앙상블 예측시스템

본 연구에서 다중모형에 의한 앙상블예측시스템을 구성함에 있어서 풍력발전 사업자의 측면에서 사용의 편의성과 비용적 실용성을 고려하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 구성한 단순 앙상블예측시스템을 보여준다. 즉, 최소 다중모형으로서 두 개의 수치기상예측(NWP) 모형을 채택되 해석영역을 중첩영역과 독립영역으로 설계하였으며, 비용적 측면에서 자체운영 방식보다 저렴한 주문생산 방식을 선택하였다. 수치기상예측 모델로는 현업에서 신뢰성이 검증된 WRF-NMM(이후 KIER1로 표기함)과 WRF-ARW(이후 KIER2로 표기함)를 선택하였다. 예보자료 생산은 서남해상의 기상특성을 고려하여 각각의 모델에 대해 별도의 설정을 지정한 후 기상예보서비스를 제공하는 프랑스 Previmeteo에 주문 생산하였다.¹⁹⁾ 앙상블 평균으로는 단순 산술평균을 사용하였으며, 최종적으로 칼만필터(KF)를 적용하여 예측정확도를 향상시켰다.

WRF-NMM(Non-hydrostatic Mesoscale Model)은 미국 환경예측국립센터(NCEP; National

Center for Environmental Prediction)에서 개발한 완전 압축성 비정수계 모델이다.²⁰⁾ 수평 격자체계는 Arakawa E, 연직 격자체계는 정압-시그마(sigma)좌표를 사용한다.

WRF-ARW(Advanced Research WRF)는 미국 대기연구국립센터(NCAR; National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 모델이다.²¹⁾ 수평격자체계는 Arakawa C, 연직 격자체계는 Eulerian 질량좌표계로 지형-정압 연직좌표를 사용한다.

앙상블 멤버인 KIER1과 KIER2는 수치기상예측 모델이 다를 뿐 아니라 Fig. 3에 도시한 바와 같이 해석영역도 상이하게 설정하였다. 즉, KIER1은 서남해 해상풍력단지 실증단지를 중심으로 부안-영광 해역을 포함하는 영역이고,⁴⁾ KIER2는 실증단지가 포함되도록 KIER1과 중첩하되 태풍의 이동경로를 고려하여 남해역으로 확장한 해석영역이다. 단, 해석영역의 수평 공간해상도는 2 km 간격의 격자계로 동일하게 구성하였다. 예보 실행시간은 10분-간격으로 48시간이고, 매일 09시, 21시에 GFS(Global Forecasting System)²²⁾를 자료동화하여 예보를 생산한다.

예보결과 후처리에서 적용한 칼만필터는 예측의 불확실성을 줄이기 위해서 응용과학분야에서 널리 이용되고 있는 필터링 기법으로,^{23),24)} 모델자료와 관측자료의 측정잡음 공분산을 고려하여 칼만이득(Karman gain)을 조정함으로써 앙상블예측시스템의 예측성능을 향상시키게 된다.²⁵⁾ 칼만필터는 Fig. 4와 같이 크게 4단계로 나뉘는데, 1단계에서는 초기값으로부터 상태 예측치와 오차공분산을 계산하고, 2단계에서는 칼만이득을 계산한다. 3단계에서는 상태 추정치를 보정한 후, 마지막 4단계에서는 상태 추정치 오차공분산을 갱신하는 과정을 반복하게 된다. 칼만필터 통계모형의 활용가

능성을 간단하게 확인하기 위해서 다음 2.2절에서 설명될 관측지점에 대해서 산점도를 분석한 결과, 칼만필터 적용유무에 따른 48시간 예측정확도의 향상은 Fig. 5에서 보인 일대일 대응선을 기준으로 강풍(약풍)대에서 다소 과소(과대)모의 경향이 보정되었고 상관계수가 +7.8%인 것으로 나타났다.

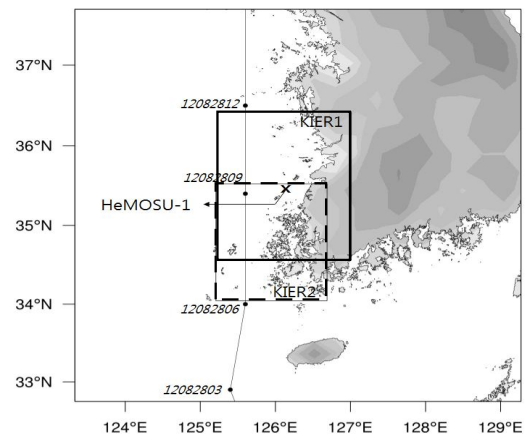


Fig. 3 Modeling domains (KIER1: solid line box, KIER2: dashed line box, HeMOSU-1 : cross hair) and the track of Typhoon Bolaven (dashed line with time stamps).

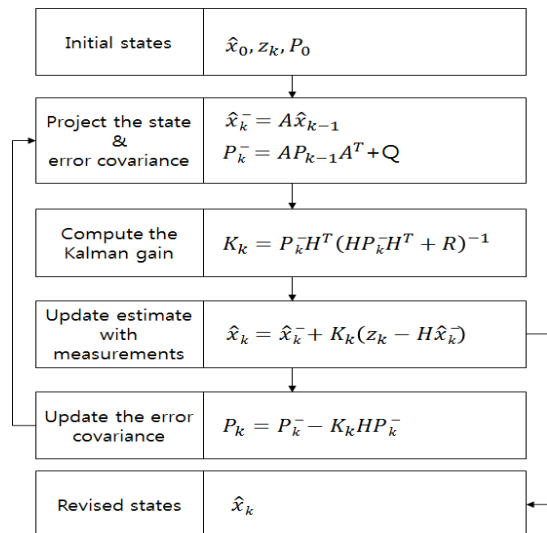


Fig. 4 Schematic diagram of the Karman Filter

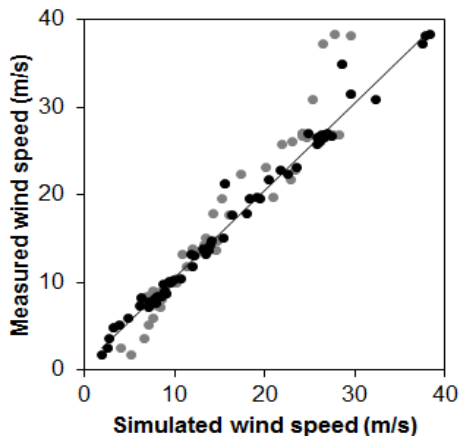


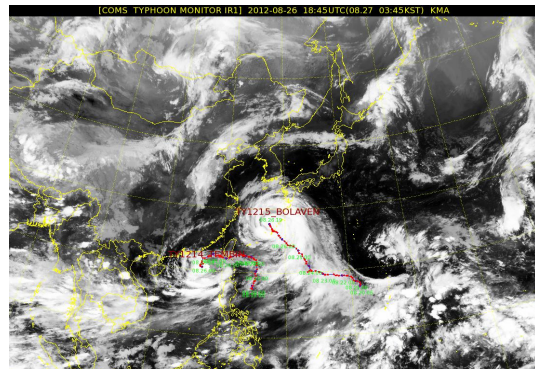
Fig. 5 Scatter plot of the observed versus simulated wind speeds (without KF: gray dots, with KF: black dots).

2.2 검증자료 및 방법

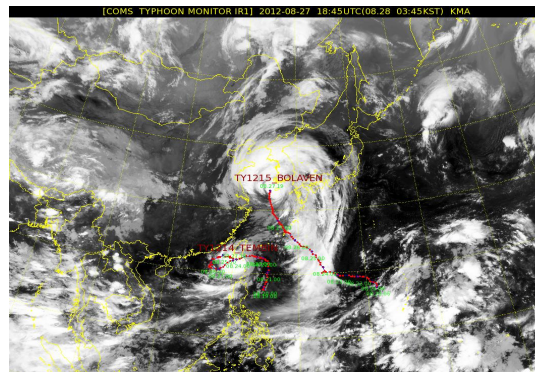
검증자료로는 북위 35도 27분, 동경 126도 07분에 설치된 해상기상탑 해모수 1호에서 측정된 10분-간격 관측풍속(OBS)을 이용하였다. HeMOSU-1은 한국전력연구원이 국내 최초로 2010년 10월에 전북 부안과 전남 영광 해역 사이의 서해상 2.5 GW 해상풍력 실증단지 예정지에 설치하였다(Fig. 3 참조).

본 연구에서는 실용적으로 구성된 단순 앙상블예측시스템의 성능을 검증하기 위해, HeMOSU-1 설치 이후 대상해역을 통과하였던 대형 태풍인 볼라벤을 선택하였다. 2012년 북서태평양에서 발생한 제15호 태풍 볼라벤은 서해상으로 북상하며 먼저 발생하였던 제14호 태풍 덴빈(Tembin)과 상호작용을 일으키는 후지와라 효과에 의해 초기 예상진로가 바뀌며 대규모로 발달하였고, 2007년 태풍 나리(Nari) 이후 가장 강력한 초대형 태풍이었다(Fig. 6).

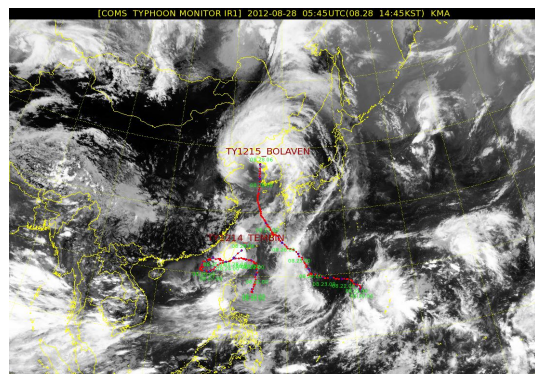
수치기상예측의 검증을 위해 예보 시간별 풍속에 대한 평균편차(BIAS)와 제곱근오차(RMSE), 상관계수(CORR)를 산출하여 정량평가 하였다. 이때 HeMOSU-1의 최상단 측정



(a) August 27 03:45 LST



(b) August 28 03:45 LST



(c) August 28 14:45 LST

Fig. 6 Chollian satellite images of Typhoon Bolaven by Korea Meteorological Administration.

높이인 해수면 97 m 높이에서의 관측풍속(O_t)과 비교하기 위해 모델자료의 하층 111 m 높이에서의 모델풍속(M_t)을 추출하였다.

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (M_t - O_t)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (M_t - O_t)^2}$$

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{t=1}^N (M_t - \bar{M}_t)(O_t - \bar{O}_t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (M_t - \bar{M}_t)^2 \sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O}_t)^2}}$$

위 식에서 N은 예보로 산출된 값의 개수이며, 편차와 제곱근오차는 0에 가까울수록, 상관계수는 1에 가까울수록 모델의 예측 풍속이 관측풍속과 유사함을 의미한다. 또한 양의 편차는 모델의 풍속 과대예측을, 음의 편차는 과소예측을 의미한다.

3. 연구결과 및 토의

양상블 멤버인 KIER1과 KIER2, 그리고 이들을 산술평균한 양상블 평균자료(ENS)의 예측성능을 HeMOSU-1의 관측풍속과 비교하였다.

태풍 블라벤이 우리나라에 직접적인 영향을 행사한 2012년 8월 26일 22시부터 8월 29일 21시까지의 기간에 대한 관측풍속과 모델풍속의 비교를 그림 7에 제시하였다. 그래프에서 다른 색상의 선들은 각각 생산시점이 다른 예보자료로, 예를 들어 M82509는 8월 25일 09시 생산된 선행예보를 의미한다.

Fig. 3의 태풍 경로와 Fig. 6의 천리안 위성 영상, 그리고 Fig. 7의 시계열 관측풍속을 종합하여 태풍 상황을 재구성해보면, 블라벤은 2012년 8월 27일 03시경 오키나와 해상에서 한반도로 진로를 변경하였으며, 이때부터 한반도 태풍의 간접영향권에 들기 시작하면서

HeMOSU-1은 27일 23시에 20 m/s 이상의 풍속을 기록하였다.

HeMOSU-1에서 풍력터빈의 정지풍속인 25 m/s 이상의 풍속이 관측된 것은 블라벤이 KIER2 해석영역의 남단에 진입하기 바로 직전인 8월 28일 04시경이며(Fig. 6b 참조), 이후 09시경에는 전라남도 완도에서 최대순간풍속 51.8 m/s, 신안군 흑산도에서 해면기압 961.9 hPa을 기록하였다.

블라벤은 8월 28일 09시경 HeMOSU-1의 서쪽 해상으로 북상하였으며, 12시에 KIER1 해석영역의 북단을 빠져나가며 최대풍속 47.8 m/s를 기록하였다. 이후 16시에 황해도 육상에 상륙하면서 서남해상은 태풍의 직접적인 영향권에서 벗어나 관측풍속이 점차 약해지게 되었다.

Fig. 7을 보면, 관측풍속과 모델풍속의 차이가 발생한 구간은 HeMOSU-1에서 최대풍속이 관측된 시점의 전후 5시간의 직접적 영향권 동안임을 알 수 있다. 즉 풍속 10 m/s 이하의 간접적 영향권 내에서는 양상블 멤버간의 차이가 없었지만, 직접적인 영향권에 들면서부터 KIER2는 태풍의 영향을 과대예측한 반면, KIER1은 30 m/s까지는 비교적 정확한 예측을 하였으나 태풍의 최대 영향기간인 5시간 동안은 풍속을 과소예측하였다. 이는 수치기상예측의 스핀업 타임이 부족하여 모델 내에서 태풍이 충분히 발달하지 못함에 따라 풍속을 과소예측한 것으로 판단된다.

정량적인 분석을 위해서 12시간 예보간격으로 양상블 멤버별 풍속의 편차, 제곱근오차 그리고 상관계수를 계산하였다.(Fig. 8 참조) 최고 예측성능의 기준을 편차의 ±0.5 이내, 제곱근오차 3 m/s 이하 그리고 상관계수 0.85 이상으로 적용할 경우, 최적의 선행예보 시간은 12~24시간 이전임을 확인할 수 있다.

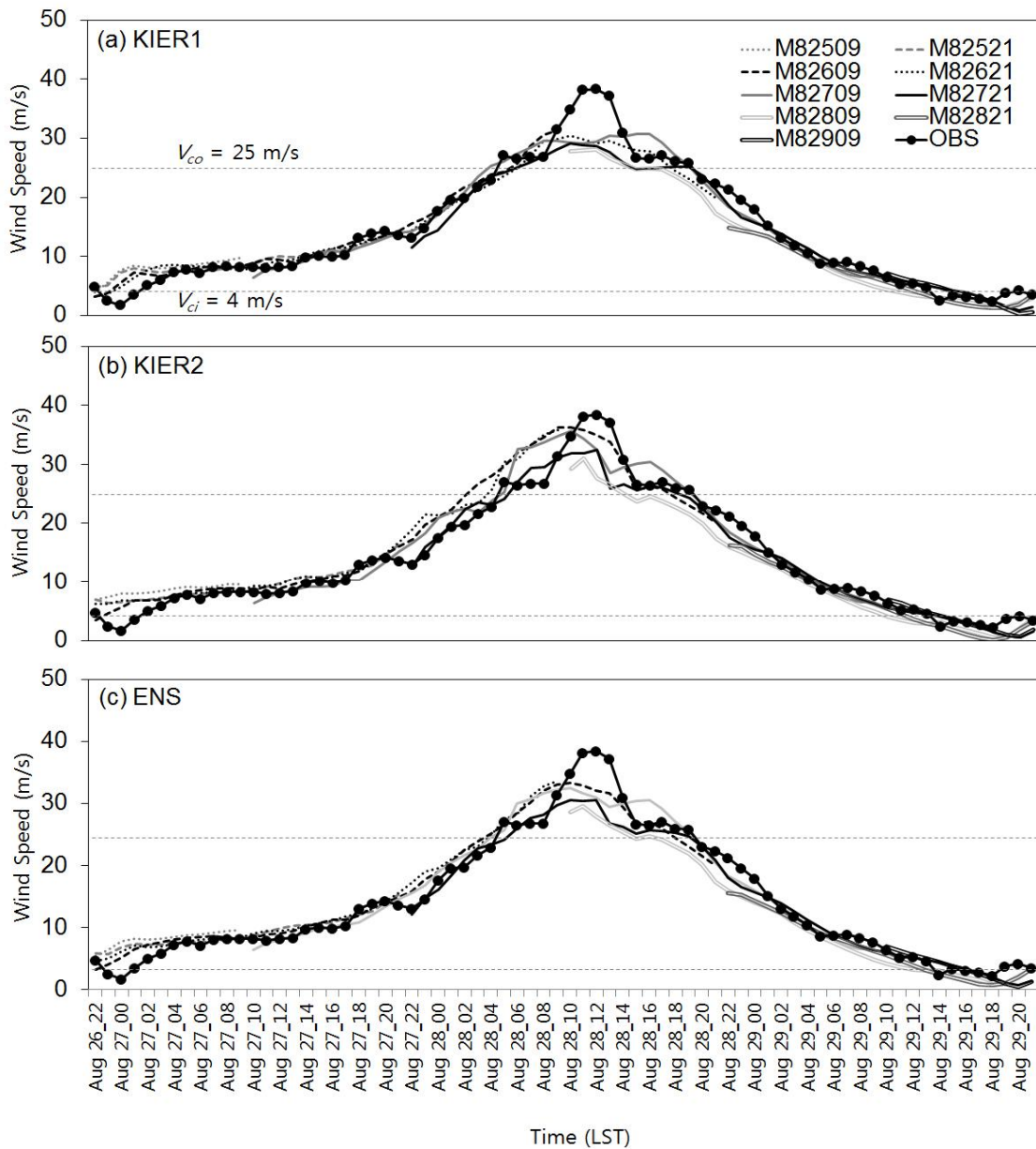


Fig. 7 Comparison of the observed (HeMOSU-1; thick black lines with circles) and the model wind speeds (KIER1, KIER2 and ENS; colored lines) for the period of 22LST 26 to 21LST 29 August 2012.

최적 예보시간에 대한 KIER1, KIER2, 그리고 ENS의 편차와 상관계수는 대동소이하나, 제공근오차는 KIER1, KIER2, 그리고 ENS가 각각 2.62, 2.89, 그리고 1.39 m/s로 차이를 보

였으며, 전체 분석기간에서도 제공근오차는 각각 2.74, 2.91, 그리고 1.44 m/s이었고 상관계수는 각각 0.79, 0.81, 그리고 0.87로 나타나, ENS가 가장 정확함을 확인할 수 있었다. 이는 정

지풍속 이하의 풍속을 잘 예측한 KIER1의 장점과 최대풍속을 잘 모의한 KIER2의 장점이 ENS에 반영되었을 뿐만 아니라 칼만필터에 의한 보정이 추가로 이루어졌기 때문이다.

보다 상세한 최적의 예보시간 선정 및 시간에 따른 풍속의 예측성 변화를 분석하기 위해서는 1일 2회 12시간 간격보다 더 조밀한 시간간격으로 예보자료가 생산되어야 함은 물론 장기간 예측자료를 수집하여 평가 사례를 늘려야 할 것으로 판단된다.

풍력단지의 운영 측면에서 중요한 태풍시 정지풍속 예측시점의 지연과 정지풍속이상의 풍속이 지속되는 시간에 대한 예보결과를 비교하였다(Table 1 참조).

최적예보시간인 12~24시간 예보(Fig. 7의 M82709 참조) 자료를 분석한 결과, 정지풍속 예측시점의 지연시간은 KIER1에서만 -1시간

Table 1 Bias statistics of properties related wind power

Category	KIER1	KIER2	ENS
Timelag for V_{co}	-1h	0h	0h
Duration for V_{co}	+1h	0h	0h

차이가 있었고 KIER2와 ENS는 지연이 없었다. KIER1에서 관측대비 정지풍속을 1시간 앞서 예보한 이유를 분석하기 위해 8월 27일 09시 예보(Fig. 7의 M82709 참조)의 분포도를 도시한 Fig. 9를 보면, 예보초기에 KIER1(Fig. 9a)이 KIER2(Fig. 9b)에 비해 태풍이 빨리 북상하여 HeMOSU-1가 위험반경 가까이에 위치하였고, 정지풍속을 미리 예측한 KIER1과 KIER2의 패턴은 Fig. 9c~d의 28일 04시까지 유지된 것으로 보인다.

그러나 최적예보시간에 정지풍속의 중단시점은 동일하여 정지풍속이상의 풍속이 지속된 시간은 KIER1만 +1시간이었고, KIER2과 ENS의 정지풍속이 지속된 기간은 관측과 동일하였다.

4. 결 론

본 연구는 실용적인 예보를 위해서 최소한의 앙상블 멤버로서 역학적 코어(dynamic core)가 다른 두 수치기상예측 모델(WRF-NMM; KIER1, WRF-ARW; KIER2)로 앙상블예측 시스템을 구성하되 서남해 해상풍력 실증단지를 중심으로 중첩과 독립영역으로 해석영역을 구성함으로써 태풍 북상의 영향도를 반영하도록 하였다.

구성된 앙상블예측시스템의 활용성에 대해 서남해 해상풍력 실증단지 내 해상기상탑 관측자료와 비교분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

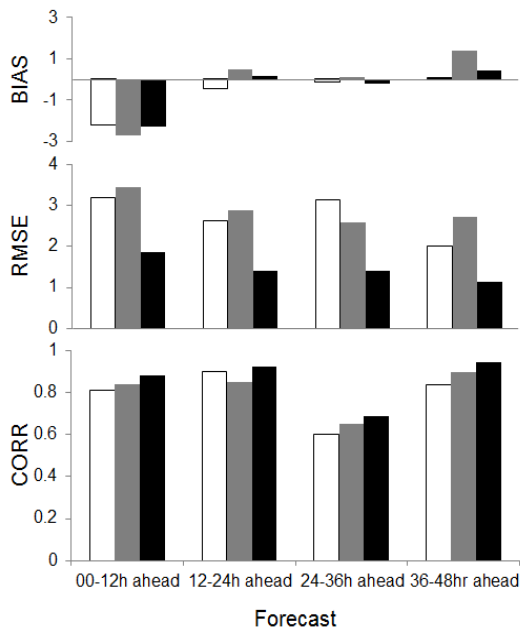


Fig. 8 BIAS, RMSE, and CORR comparisons of the model wind speeds (KIER1: white, KIER2: gray, ENS: black boxes) by the ahead times.

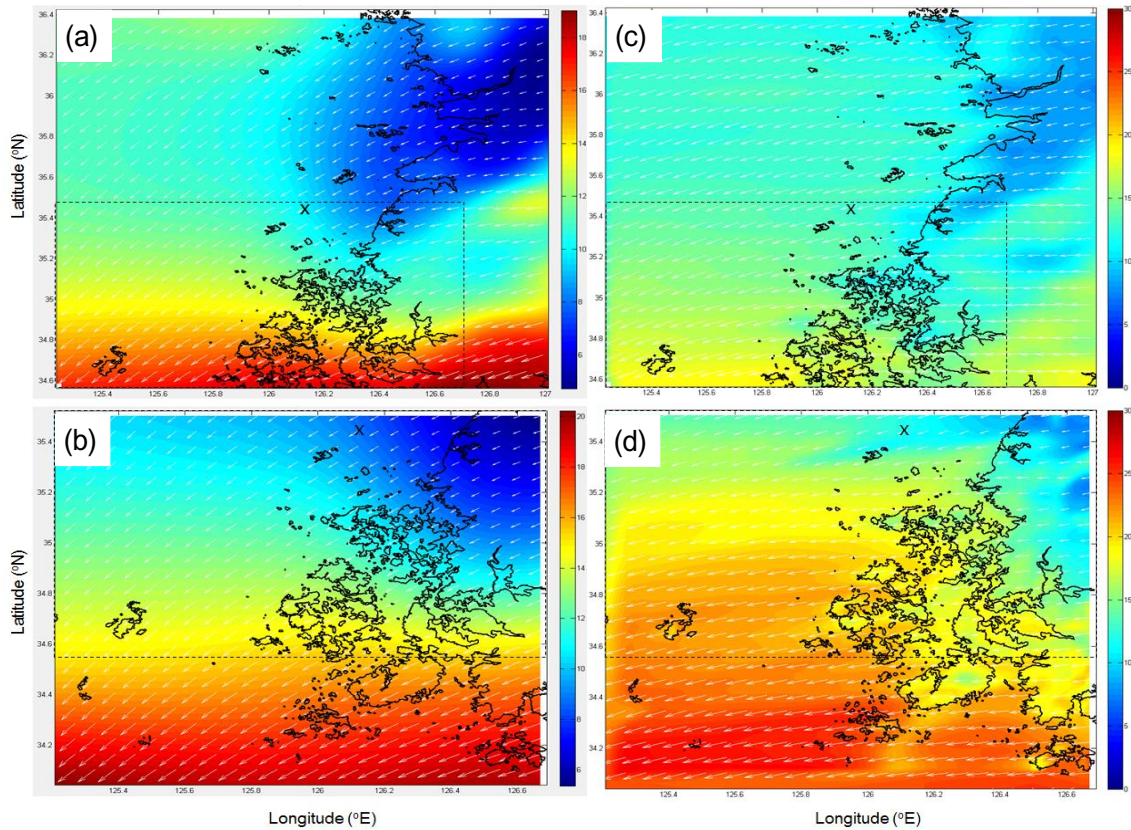


Fig. 9 Horizontal distribution of wind speed and vector for KIER1(top panels) and KIER2 (bottom panels) at (a-b) 09LST 27th and (c-d) 04LST 28th August, 2012. (HeMOSU-1 : cross hair).

- (1) 앙상블예측시스템의 앙상블평균 ENS가 단일모델 KIER1, KIER2 보다 풍속예측성능이 훨씬 우수하였다. 특히 10 m/s 이상의 풍속구간에서 예측성능 차이가 크게 났고, 통계검증결과 ENS는 KIER1와 KIER2에 비해 오차(상관도)가 각각 90% (9.2%), 102% (6.9%) 향상된 것으로 나타났다. 풍력은 풍속의 세제곱에 비례하므로 풍력예보시 앙상블예측시스템의 예측성능 향상은 단일모델 대비 수십% 이상의 뚜렷한 향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.
- (2) ENS에 의한 정지풍속의 예측시점과 지속기간의 향상도 기대되는 바, 발전운영기

제어시점에 오류를 줄여 발전효율을 높일 것으로 기대된다.

- (3) 본 시스템의 최적의 예보시간은 12~24시간이전이었다. 이 선행예보시간에 대한 편의(± 0.5 이내), 제공근오차(3 m/s 이하), 그리고 상관계수(0.85이상) 모두 우수한 통계결과가 나왔지만 보다 정밀한 최적의 선행예보시간을 확보하기 위해서는 앙상블예측시스템의 예보간격을 조밀하게 디자인해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 자체 컴퓨팅 자원을 보유하고 있지 않고도 수집 가능한 상용예보자료를 활용

하여 최소한의 비용으로 신뢰도가 높은 풍속 예측이 가능한 실용적 앙상블예측시스템을 제안하였고 특히 태풍내습 사례에 대하여 그 유용성을 확인하였다.

하지만 본 연구는 하나의 사례연구이므로 향후 다양한 강풍 사례를 확보하여 장기간의 성능평가를 통해 신뢰구간을 정량화하고 앙상블 멤버 구성에 따른 민감도 실험을 통해 앙상블예측시스템을 보완하여 상업적인 활용이 가능하도록 지속적으로 개선·보완할 필요가 있다

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업으로 수행한 결과입니다. (GP2014-0030)

Reference

1. REN21, Renewables 2015 - Global Status Report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, 250p, 2015.
2. US EPA, Proposed Federal Plan for the Clean Power Plan, 755p, Washington, 2015.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy, Fourth Basic Plan for Technology Development, Application, and Deployment of New & Renewable Energy (2014-2035), Seoul, 20p, 2014.
4. Lee J.-s., Kang K.-s., Park B.-m., Won Y.-j., Kim B.-g. and Ahn N.-s., A study on Current Status and Outlook of Offshore Wind Development in Korea, Journal of Wind Energy, Vol. 2, No. 1, pp. 6-14, 2011.
5. KIER(Korea Institute of Energy Research), New & Renewable Energy Atlas of Korea, <http://kier-atlas.org>
6. Kim H.-G., Kang, Y.-H., The 2010 Wind Resource Map of the Korean Peninsular, Journal of Wind Engineering Institute Korea, Vol. 16, No. 4, pp. 167-172, 2012.
7. Kim H.-G., Hwang H.-J., Kang Y.-H. and Yun C.-Y., Comparison of Offshore Wind Retrieval Software from SAR Satellite Imagery, New & Renewable Energy, Vol. 9, No. 3, pp. 14-19, 2013.
8. Kim H.-G., Kang Y.-H. and Yun C.-Y., Comparative Analysis on Commercial Wind Resource Maps of South Korea, Journal of Wind Engineering Institute Korea, Vol. 19, No. 1, pp. 9-14, 2015.
9. ENERCON, ENERCON Wind Energy Converters - Product Overview, ENERCON GmbH, Germany, 13p, 2010.
10. South China Morning Post, Typhoon Usagi's Message for Hong Kong's Wind Farms, 2013.
11. Choi K.-S., Cha Y.-M. and Kim T.-R., Decadal Change of Frequency in Korea Landfalling Tropical Cyclone Activity, Jour. Korean Earth Science Society, Vol. 33, No. 1, pp. 49-58, 2012.
12. Kim T.-R., Characteristics of Tropical Cyclones in 2011, Water for the Future, Vol. 45, No. 1, pp. 14-17, 2012.
13. Seo S. N. and Kim S. I., Storm Surges in West Coast of Korea by Typhoon Bolaven (1215), Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 41-48, 2014.
14. Kim H.-G., Lee Y.-S., Jang M.-S. and Kyong N.-H., A Study on Development of a Forecasting Model of Wind Power Generation for Walryong Site, The Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 2, pp. 27-34, 2006.
15. Kim, H.-G., Lee Y.-S. and Jang M.-S., Kyong N.-H., Development of the Wind Power Forecasting System, KIER Forecaster, New&Renewable Energy, Vol. 2, No. 2, pp. 37-43, 2006.

16. Kim H.-G., Lee Y.-S. and Jang M.-S., Cluster Analysis and Meteor-Statistical Model Test to Develop a Daily Forecasting model for Jeju wind Power Generation, Journal of the Environmental Sciences, Vol. 19, No. 10, pp. 1229-1235, 2010.
17. Yoon J. W., Lee Y. H., Lee H. C., Ha J.-C., Lee H. S. and Chang D.-E., Wind Prediction with a Short-range Multi-Model Ensemble System, Atmosphere, Vol. 17, No. 4, pp. 327-337, 2011.
18. Lee J.-K., Kim J.-Y., Oh K.-Y., Ryu M.-S. and Lee J.-S., Integrated Measurement System for Offshore Meteorological Mast of Offshore Wind Farm, Journal of Wind Energy, Vol. 2, No. 1, pp. 53-60, 2011.
19. Previmeteo Available from <http://previmeteo.com>
20. Janjic, Z. I., A Non-hydrostatic Model Based on a New Approach, Meteorological Atmospheric Physics, Vol. 82, No. 1, pp. 271-285, 2003.
21. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M, Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note NCAR/TN0475+STR, National Center for Atmospheric Reserach, Boulder, Co., USA, 125pp, 2008.
22. Campana K., Caplan P., Alpert J., et al., Technical procedures Bulletin for the T382 Global Forecasting System, 2005. Available from http://www.emc.ncep.noaa.gov/gc_wmb/Documentation/TPBoct05/T382.TPB.FINAL.htm
23. Lim, G.-H., Suh A.-S., Ha J.-H., An Affordable Implementation of Kalman Filter by Eliminating the Explicit Temporal Evolution of the Background Error Covariance matrix, Atmosphere, Vol. 23, No 1, pp.33-37, 2013.
24. Kalman, R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering, Vol. 82, No 1, pp. 35-45, 1960.
25. Yoo, C., Hwang, J. Kim, J., Use of the Extended Kalman Filter for the Real-Time Quality Improvement of Runoff Data: 1. Algorithm Construction and Application to One Station, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 45, No 7, pp. 697-711, 2012.