



[2016-10-WD-011]

풍력예보를 위한 단순 앙상블예측시스템의 예측성 향상

김진영¹⁾ · 김현구^{1)*} · 강용혁¹⁾ · 윤창열¹⁾ · 김창기¹⁾ · 김지영²⁾ · 이준신²⁾

Improvement of a Simple Ensemble Prediction System for Wind Power Forecasting

Jin-Young Kim¹⁾ · Hyun-Goo Kim^{1)*} · Yong-Heack Kang¹⁾ · Chang-Yeol Yun¹⁾ · Chang Ki Kim¹⁾ ·
Ji-Young Kim²⁾ · Jun-Shin Lee²⁾

Received 15 June 2016 Revised 13 July 2016 Accepted 13 July 2016

ABSTRACT Improvement of a simple and practical Ensemble Prediction System (EPS) based on multi-models for wind power forecasting was performed by optimizing various ensemble member combinations. Three types of ensemble methods were compared; multi-models, multi-physics and hybrid ensemble. Multi-models were composed of four different numerical weather prediction models; WRF-NMM, WRF-ARW with small and large domains, UM-RDAPS and WW3. WRF-ARW was also used in multi-physics by designing two different planetary boundary layer and surface layer scheme, respectively. As a result, simulated wind speed from the multi-models EPS showed smaller root-mean-square error (RMSE) and a higher spread (SPRD) than those of the multi-physics EPS. Among the five different multi-models, three models such as KIER1, KIER2 and KMA-WW3 were reliable in terms of RMSE and correlation coefficient (CORR) for all typhoon cases. Therefore, a new EPS constructed by simple averaging the wind speeds taken from the three models. The new EPS showed a higher correlation and agreement with a value of 1.4% and 2.1% compared to those in old EPS, respectively.

Key words Wind power forecasting(풍력예보), Ensemble prediction system(앙상블예측시스템), Multi-model(다중모델), Multi-physics(다중물리), Typhoon Bolaven(태풍 볼라벤), Typhoon Tenbin(태풍 텐빈), Typhoon Sanba(태풍 산바)

1. 서론

파리협약 이후 전 세계는 온실가스 감축목표 이행을 위한 노력으로 전력산업 분야 육성을 통한 신재생에너지에 대한 투자를 확대하고 있다. 특히 해상풍력분야는 에너지

고갈 위험에 대한 능동적인 대처와 온실가스 감축, 일자리 창출 수단으로 인식하고 치열한 시장선점 경쟁이 전개되고 있으며, 세계 각국은 해상풍력 확대를 위해 초기 건설비 절감 및 운영 단계에서의 경제성을 확보하기 위한 기술개발 중에 있다. 이에 우리나라도 환경적 규제를 완화하고 풍력 산업 활성화를 위해 서남해상 2.5GW 해상풍력발전 개발 사업을 시작하였다.^[1]

풍력은 바람의 자연적인 변동성 때문에 일정 풍속 이상의 바람이 불어올 때만 불규칙적으로 발전이 가능하며 극한 풍속이상에서는 발전을 멈춘다. 이러한 풍력의 발전특

1) New & Renewable Energy Resource Center, Korean Institute of Energy Research Center, Korean Institute of Energy Research
E-mail: hyungoo@kier.re.kr
Tel: +82-42-860-3376 Fax: +82-42-860-9876

2) Korea Electric Power Research Institute

성으로 발전기 운영 및 전력계통의 변동을 유발하는 부하 요인이 되기 때문에 안정적인 발전기 운영 및 전력계통의 운영을 통한 풍력발전의 지속적인 보급을 위해서는 풍력발전량 예보가 매우 중요하다.^[2,3]

발전량 예보는 발전소 운영단계로부터 전력거래가 이루어지는 시장단계까지 풍력발전의 경제성을 확보하기 위한 핵심기술이다. 풍력의 정확한 예측이 이루어지면 풍력발전소 운영자와 업계 전문가가 풍력터빈을 최대용량에 가깝게 운영할 수 있어 소비자의 에너지 비용부담을 줄일 수 있다. 특히 태풍 내습의 경우 제어시점을 고려하여 터빈운동을 효율적으로 조절하면 가능하다. 실제 25m/s 이상의 정지풍속에서 피치각을 제어하여 서서히 발전량을 줄이고 풍속이 정지풍속이하로 복귀했을 때 정상발전모드로 전환하면 출력을 최대화할 수 있게 된다.^[4] 따라서 해외 발전 전력공급 사업은 발전소 기자재 지원 및 시공뿐만 아니라 예보기술을 포함한 소프트웨어 개발범위를 포함하여 진행되는 추세이다.

기상분석을 바탕으로 한 풍력예보 연구는 유럽 및 미국 등 선진국들을 중심으로 활발하게 진행되어 오고 있다. 예를 들면, 유럽의 경우 나라마다 차이가 있지만 1980년대 말부터 연구가 시작되었고^[5] 2000년대 들어 ANEMOS^[6], ANEMOS.plus^[7] 과제를 수행하여 유럽연합간 풍력발전 예보시스템을 구축하여 세계 풍력시장 점유율 상승에 크게 기여 하였다.^[2] 최근 미국 에너지부(DOE)는 정책적으로 풍력에너지 단기예보를 위한 15시간 내 수치모델 개선을 목표로 산간-계곡 지역의 풍력에너지 발전 프로세스 연구를 진행해오고 있다.^[8] 미국 IBM사는 풍력터빈의 센서, 기상 예보, 구름의 이미지 등 다양한 데이터를 이용하여 최소 15분 후, 최대 1개월 후의 기상변화에 따른 발전량을 예측할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 중국 장비이 풍력발전을 연계한 실증 프로젝트를 수행한 바 있다.^[9] 하지만 국내에서는 이와 같은 연구가 2006년 이후에서야 시작하였으며, 소수에 불과하고 대부분 통계모형에 의한 단기 예보를 다루고 있다. 최근 한국에너지기술연구원에서 발전사업자를 위한 한 가지 모델 사용에 대한 불확실성을 보완하기 위해서 새롭게 앙상블예측기술을 도입하여 실용적인 앙상블예측시스템을 개발한 바 있다.^[4]

한편 지구온난화에 따른 해수면 온도 상승과 대기순환

변화에 따라 강력한 태풍발생이 빈번해짐에 따라 대규모 해상풍력발전 실증단지인 서남해상의 기상조건이 혹독해지고 있다. 2012년의 경우, 8월 후반부터 9월 중순까지 3차례 태풍이 북상하였으며, 이들 모두 정지풍속 이상의 강풍이 불었다. 실증단지내 풍력발전기가 설치되어 있었다면 최대 3차례나 정지운영스케줄이 작동하였을 것이다. 기상은 지역적 특색이 강하며 우리나라 풍력발전 사업단지 개발운영을 위해서는 우리나라에 적합한 예보기술 개발과 검증이 필요하다.

최근 김진영등^[4]은 이들 중 태풍 볼라벤 사례를 극한 풍황조건으로 감안하여, 풍력발전 설치 및 운영시 풍력예보용 단순 앙상블예측시스템을 구축하여 시험평가에 대한 선행연구를 수행한 바 있다. 앙상블예측시스템은 전 세계 기상현업예보기관에서는 다양한 현상의 가능성을 파악하기 위해서 모두 채택하고 있는 예보기술로써, 앙상블예측시스템은 크게 다중모델 및 다중물리모델 기반의 앙상블 멤버 구성 등 다양하다. 기 구축한 앙상블예측시스템은 풍력발전 사업자의 측면에서 사용의 편이성과 비용적 실용을 고려하기 때문에 최소한의 앙상블 멤버를 구성하였지만, 활용 가능한 다양한 앙상블멤버인 기상수치모델자료들에 대한 민감도 분석은 심도 있게 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 앙상블멤버의 민감도 분석을 통해 다중모델 앙상블예측시스템을 검토하고, 최적화된 앙상블멤버로 앙상블예측시스템을 보완하여 예측성능을 높이고자 하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 앙상블 멤버

본 연구에서 고려한 앙상블 멤버는 앙상블 기법에 따라 Table 1에 보인바와 같이 다중모델과 다중물리로 구분하였다. 이용된 모델은 총 4 종의 기상 및 해양모델이고, 이는 다시 대상영역과 생산기관에 따라 6 종으로 세분화된다. 모든 모델의 실험 자료는 비용대비 실용성을 고려하여 주문제작하거나 무료로 수집이 가능하다. 이들 수치기상예측 모델과 해양예측모델은 현업에서 신뢰성이 검증된 모델들을 확보하였으며 기상예측모델은 WRF-NMM^[10](이후 KIER1), WRF-ARW^[11](이후 KIER2, 3) 그리고 UM-RDAPS^[12](이

후 KMA-UM)를 선택하였고, 해양예측 모델은 KMA-WW3^[13]와 JMA-WW3^[14]를 선택하였다. 다중물리 앙상블기법은 풍력터빈 높이의 풍속의 변화에 영향을 크게 끼치는 대기 경계층과 지표모델을 각 2 개씩 조합하였다. 대기경계층기법은 Mellor-Yamada-Janjic^[15]과 Yonsei University^[16] 기법을 선택하였고 지표모델은 Noah^[17]과 Rapid Update Cycle^[18] 기법을 선택하였다.

기존의 앙상블예측시스템^[4]에서 이용된 KIER1과 KIER2 외에 본 연구에서 새롭게 고려한 KIER3은 해상도가 1km 간격으로 상세하게 구성된 대신 동일한 계산 시간동안 자료를 생산하기 위해서 도메인은 실증단지를 포함하고 KIER1과 동일하게 구성하되 4배 줄인 영역을 대상으로 한다.

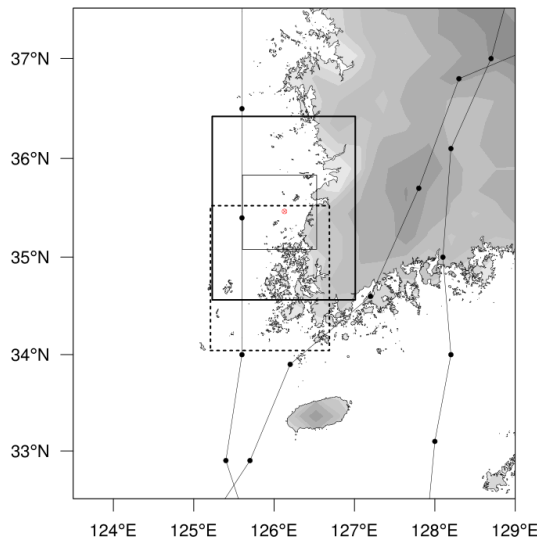


Fig. 1. Analysis domains (UM, KMA, JMA: outer box, KIER1: inner solid line box, KIER2: inner dashed line box, KIER3: inner smallest solid line box, HeMOSU-1: cross hair with circle) and the track of typhoons (Bolaven: left gray line, Tenbin: middle gray line, Sanba: right gray line with time stamps, respectively)

UM-RDAPS는 자료의 생산목적이 한반도 전역의 일기예측이므로 서남해상 실증단지를 모두 포함하나 해석영역의 수평해상도가 12km 간격으로 성근 격자계로 구성된다. 그리고 KMA-WW3와 JMA-WW3 역시 생산 목적이 한반도와 일본 해역 전역이므로 실증단지를 모두 포함하고 각각 8km와 5km의 해상도를 지닌다. 다중물리모델의 대상영역은 모두 KIER3과 동일하다(Fig. 1).

2.2 분석사례 및 검증자료

모델자료는 48시간 예보자료를 동일하게 분석에 활용하였으며 예측모델의 성능을 검증하기 위한 자료는 Fig. 1에서 영역 중심(북위 35도 27분, 동경 126도 07분)에 위치한 해상기상탑 자료를 이용하였다.^[19] 한국전력연구원에서 설치한 해상기상탑 해모수 1호(이후 HeMOSU-1) 풍속자료는 2012년 이후 10분 간격으로 측정된 자료를 이용하였다.

앙상블예측시스템의 예측 성능을 검증하기 위해서 이용한 자료는 풍력발전기 운영정지풍속인 25m/s(Fig. 2 점선) 보다 센 바람이 연속적으로 불었던 태풍 볼라벤, 덴빈, 그리고 산바 케이스를 선택하였다. 2012년 제15호 태풍 볼라벤은 8월 26일부터 29일까지 서남해상 풍력발전 실증단지를 가까이 통과하여 직접적인 영향을 끼친 초대형 태풍이고, 연이어 8월 28일부터 31일까지 제 14호 태풍 덴빈, 9월 15일부터 18일까지 산바가 우리나라를 통과하면서 실증단에 간접적인 영향을 끼쳤다.

2.3 분석방법

풍력터빈 허브높이를 대표하여 100m의 측정풍속과 모델에서 모의된 풍속을 분석하였다. HeMOSU-1 측정높이와 6종의 기상 및 해양모델에서 모의된 풍속의 분석 연직높

Table 1. Description of Ensemble members

Category	Models	Experiments	Dynamics/Physics
Multi-models	WRF-NMM WRF-ARW UM-RDAPS WW3	KIER1 KIER2, KIER3 KMA-UM KMA-WW3, JMA-WW3	Non-hydrostatic spectral model with full equation Non-hydrostatic finite different model with full equation Non-hydrostatic finite different model with full equation Full spectral model
Multi-physics	WRF-ARW	KIER3.1 KIER3.2 KIER3.3 KIER3.4	Meollor-Yamada-Janjic PBL, Unified Noah LSM scheme Mellor-Yamada-Janjic PBL, Rapid Update Cycle LSM scheme Yonsei University PBL, Unified Noah LSM scheme Yonsei University PBL, Rapid Update Cycle LSM scheme

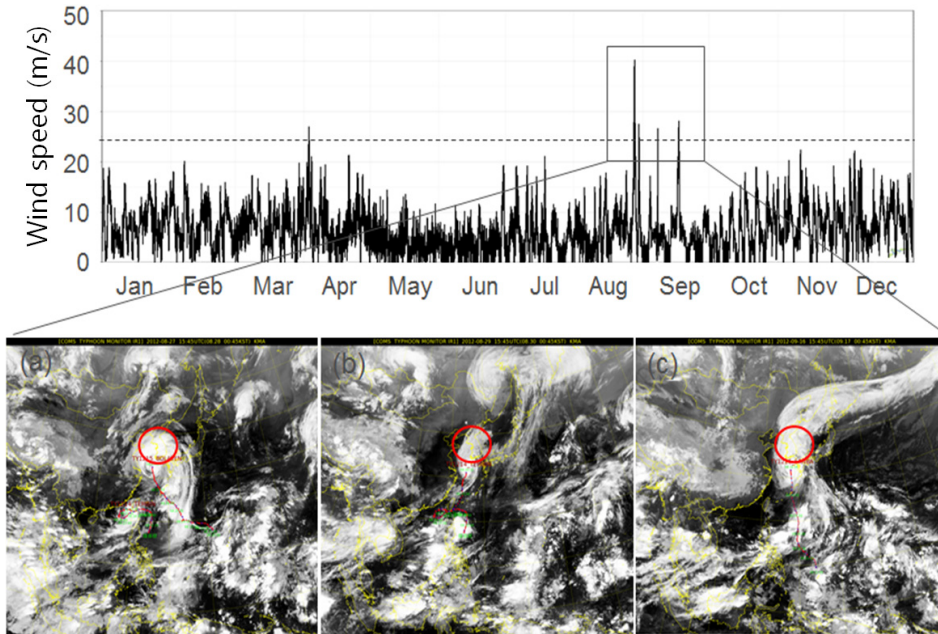


Fig. 2. Chollian satellite images of (a) Typhoon Bolaven (28 August, 2012), (b) Typhoon Tenbin (30 August 2012), (c) Typhoon Sanba (17 September, 2012) by Korea Meteorological Administration

이들이 다양하기 때문에 연직내삽하여 동일높이에서 풍속을 계산하였고, 특히 해양모델은 해수면 하층바람만 존재하므로 기상모델들(KIER1, KIER2)의 앙상블 대기상태 즉 마찰속도와 안정도로 모닌-오브코브 길이(Monin-Obukhov length)를 적용시켜 연직풍속 프로파일^[20, 21]에서 산출된 변화량으로 보정하여 추정하였다.

앙상블 멤버의 민감도 및 멤버 조합의 최적화, 그리고 최종 앙상블예측시스템의 정확도를 분석하기 위해서 제공근오차(RMSE), 상관계수(CORR) 및 일치도(IOA)를 산출하였고, 앙상블 불확도를 계산하기 위해서 스프레드(SPRD)를 산출하여 정량적으로 평가하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (F_t - O_t)^2} \quad [m/s] \quad (1)$$

$$CORR = \frac{\sum_{t=1}^N (F_t - \bar{F}_t)(O_t - \bar{O}_t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (F_t - \bar{F}_t)^2 \sum_{t=1}^N (O_t - \bar{O}_t)^2}} \quad [-] \quad (2)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (O_t - F_t)^2}{\sum_{t=1}^N [|F_t - \bar{O}| + |O_t - \bar{O}|]^2} \quad [-] \quad (3)$$

$$SPRD = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (\bar{F} - F(n))^2} \quad [m/s] \quad (4)$$

위 식에서 N은 예보로 산출된 값의 개수이며, 제공근오차는 0에 가까울수록, 상관계수와 일치도는 1에 가까울수록 모델의 예측 풍속이 관측풍속과 유사함을 의미한다. M은 예보모델의 개수이며, 스프레드는 작을수록 좋으나 보수적 확률예보의 가이드를 마련할 때에는 스프레드가 클수록 불확실성을 최대한 고려할 수 있는 안정적인 시스템을 의미한다.

3. 결과

3.1 앙상블 멤버 민감도 분석

본 연구에서는 다중모델, 다중물리 그리고 하이브리드 기반의 앙상블기법을 모두 비교하였다. Fig. 3은 다중모델, 다중물리, 그리고 하이브리드 앙상블에 대한 태풍사례별 제공근오차(RMSE)와 스프레드(SPRD)를 나타낸다. 태풍 볼라벤에서는 제공근오차가 다중모델, 다중물리모델, 그리고 하이브리드 앙상블에서 각각 1.19, 1.61 그리고 0.99m/s

이었고, 스프레드가 각각 1.71, 0.18 그리고 1.96m/s이였다. 태풍 덴빈은 제공근오차가 다중모델, 다중물리 그리고 하이브리드 앙상블에서 각각 2.65, 6.56 그리고 4.60m/s 이었고, 스프레드가 각각 3.66, 0.79 그리고 3.91m/s이였다. 태풍 산바는 제공근 오차가 다중모델, 다중물리모델, 그

리고 하이브리드 앙상블에서 각각 1.29, 3.38 그리고 2.22m/s 이었고, 스프레드가 각각 1.01, 0.48 그리고 1.31m/s이였다. 모든 태풍 사례에서 평균적으로 다중모델, 다중물리 그리고 하이브리드 앙상블의 제공근 오차가 각각 1.71, 3.85 그리고 2.60m/s이었고, 스프레드가 각각 2.12, 0.48 그리

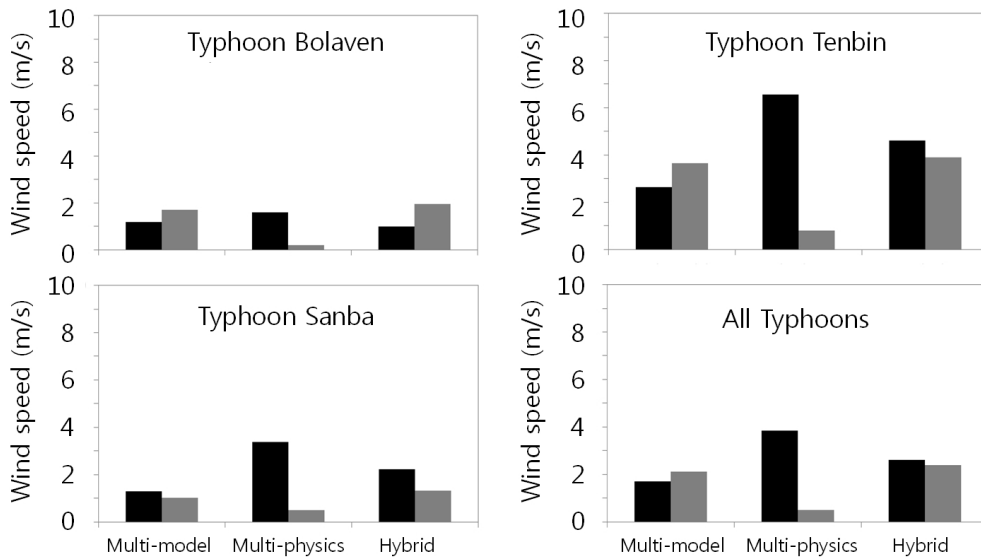


Fig. 3. Root mean square error (RMSE) and ensemble spread (SPRD) from multi-models, multi-physics and hybrid models for Typhoon Bolaven, Tenbin, Sanba and all cases, respectively. Black and gray box represent RMSE and SPRD, respectively

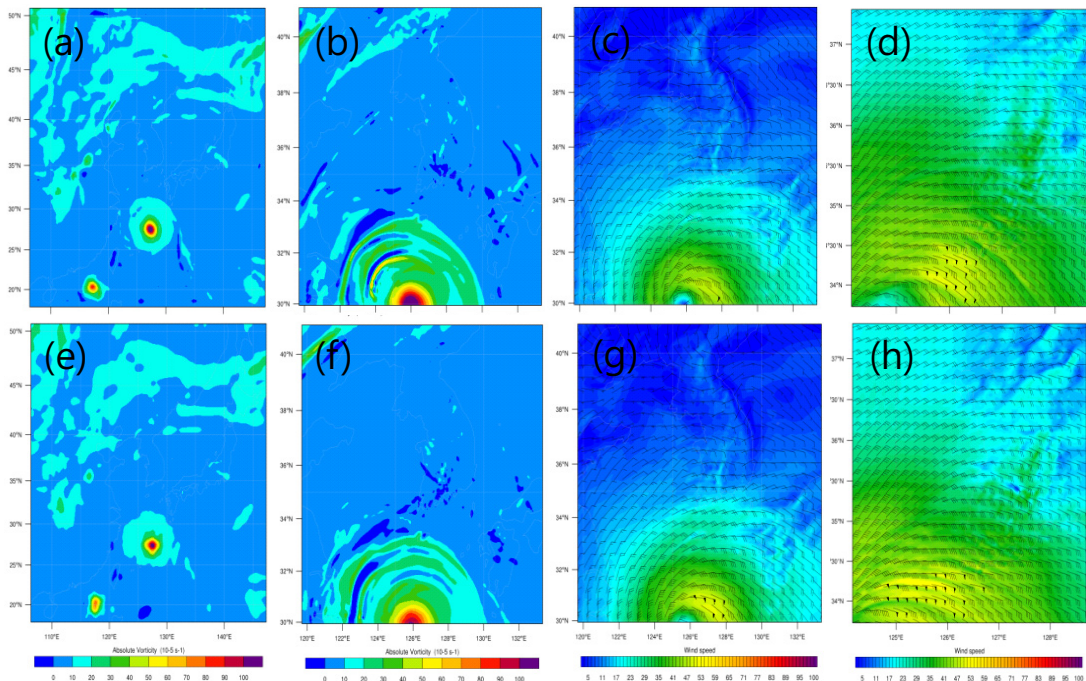


Fig. 4. Horizontal distribution of absolute vorticity (500 hPa, units: 1/s) and winds (10 m AGL, units: m/s) in (a-d) multi-models and (e-h) multi-physics. (a,e) 27 km, (b,f) 9 km, (c,g) 9 km, (d, h) 3 km

고 2.39m/s이었다.

다중모델과 다중물리 앙상블의 풍속오차에 대한 원인을 자세히 분석하기 위해서 3차원 구조분석이 가능한 대표 기상수치모델 즉 다중모델에서 KIER1, 다중물리모델에서 KIER3.4에서 모의된 태풍의 상하층 구조를 Fig. 4와 같이 비교분석하였다. 태풍의 북상에 따른 태풍의 순환과 바람의 수평분포를 비교하기 위해서 2012년 8월 26일 18 UTC 27km(Fig. 2a, e), 8월 27일 00 UTC 9km(Fig. 2b, f)의 절대와도와 2012년 8월 27일 00 UTC 3km(Fig. 2c, g), 8월 27일 06 UTC 1km(Fig. 2d, h)의 바람장을 나타낸다. 500hPa 와도 분포(Fig. 2a-b, e-f)에서 $100 \times 10^{-5} (1/s)$ 정도의 최대 와도가 동일하게 나타났으며 원형구조의 태풍은 유사하게 모의하였다. 하지만 다중모델에서 태풍중심에서 반경 50km 구간내에서 약 $20 \times 10^{-5} (1/s)$ 정도 절대와도가 컸다. 따라서 태풍 발달 정도에 따라 강도의 차이가 다소 크게 나타났다. 이런 특징은 Fig. 2c와 Fig. 2g의 풍속분포에 반영되어 20m/s 이하의 약풍대인 태풍의 눈으로 추정되는 반원이 잘 나타났으나 태풍의 발달과 진행이 빨랐던 다중모델에서 좀 더 온전한 태풍의 눈이 나타났다. 북쪽으로 진행하는 태풍 볼라벤의 북동쪽 반원에 뚜렷한 강풍대가 북위 34도 30분까지 위치하고 북위 36도까지 30m/s 이상의 강한 바람이 불었다(Fig. 2d). 하지만 태풍 북상과 와도의 차이로 다중물리모델의 경우, 북위 34도 20분까지 강풍대가 나타났고, 35도 30분까지 30m/s 이상의 강한 바람이 부는 것으로 나타났다(Fig. 2h).

3.2 앙상블 멤버 조합

다중모델의 앙상블 멤버별 민감도를 분석하여 정확도에 대한 예측성능이 안정적인 멤버로 최적화하였다. 2012년 8월 26일부터 2012년 9월 19일까지 기간 중에서 태풍이 직접적으로 영향을 끼치는 분석기간을 고려하여 다중모델 KIER1, KIER2, KIER3, KMA-UM, WW3 그리고 JMA-WW3의 총 6개 멤버를 예보시간별 제공근오차(막대) 및 상관계수(실선)에 대한 정량적 수치를 비교하였다(Fig. 5). 앙상블멤버 조합을 위한 예측성능의 기준은 기존 단순앙상블예측시스템에 근접한 3m/s 이하의 제공근오차 그리고 상관계수 0.65 이상을 적용하였다. 검은색의 막대와 실선은 24시간 예보(이후 D+1)를 가리키고, 회색 막대와 실선

은 24시간 이후부터 48시간 예보(이후 D+2)를 가리킨다. 태풍 볼라벤의 경우 KIER3에서 D+2 예보오차가 4.73으로 임계치 3m/s를 초과하였고, 태풍 덴빈의 경우 KIER3, KMA-UM 모두 D+2 예보 오차가 크고 상관계수가 0.8이하였다. 태풍 산반에서는 KIER3, KMA-UM, 그리고 JMA-WW3에서 상관계수가 0.42, 0.02 그리고 0.44로 임계치 0.65이하였다. 따라서 모든 태풍 사례에 대해 예보오차가 3m/s 이하이고, 상관계수가 0.65이상인 모델은 KIER1, KIER2, 그리고 KMA-WW3였다.

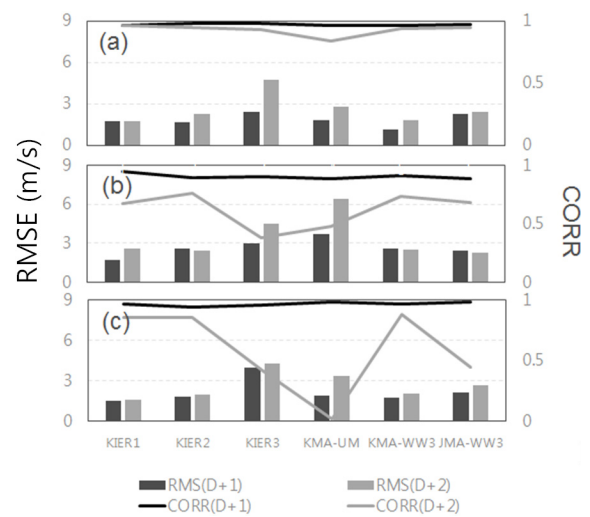


Fig. 5. Root-mean-square error (RMSE) and correlation coefficient (CORR) for forecast day +1 (D+1) and forecast day +2 (D+2) among ensemble members in Multi-models. (a-c) represent for Typhoon Bolaven, Tenbin, and Sanba in 2012, respectively

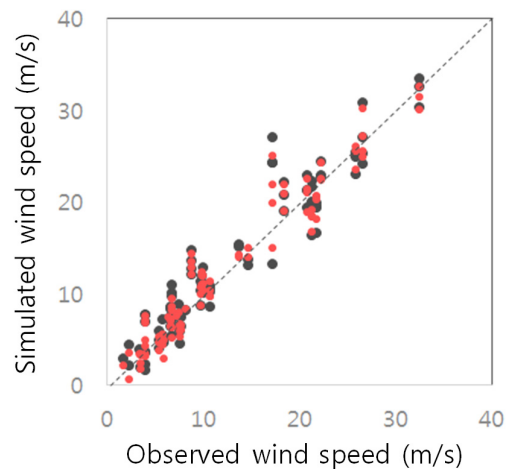


Fig. 6. Relationship of observed and simulated wind speed with 6 hourly intervals during all typhoon cases from 26 August to 18 September, 2012

다중모델에서 태풍내습에 대한 앙상블멤버의 최적화를 통해 최종 선택된 KIER1, KIER2 그리고 KMA-WW3의 앙상블평균과 기존 KIER1과 KIER2의 앙상블평균에 대한 예측성을 산포도로 비교하였다(Fig. 6). KMA-WW3의 예보시간에 맞추어 3시간 간격의 평균풍속을 측정 풍속과 비교한 결과, 실제 상관계수와 일치도가 각각 +1.4%, +2.1% 개선되었다. 기존 시스템과 신규 시스템의 차이가 되는 KMA-WW3에서 모의된 터빈높이에서의 바람은 동일 대기 조건 하에서 추정에 활용된 초기 10m 풍속과 KMA-RDAPS를 파랑모델에 의해 재해석된 풍속의 변동성이 잘 모의된데 있는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 앙상블 멤버별 민감도 분석을 통하여 최적화된 앙상블멤버를 구성하여 태풍내습시 풍력예보를 위해 기 구축된 실용적인 단순앙상블예측시스템을 보완하고 예측성능을 개선하였다. 2012년 이례적으로 3차례 연속으로 북상하였던 제15호 블라벤(2012년 8월 26일~2012년 8월 29일), 제14호 덴빈(2012년 8월 28일~2012년 8월 31일), 그리고 제16호 산바(2012년 9월 15일~2012년 9월 18일)를 중심으로 극한풍속의 기상상황을 가정하여 시스템의 성능을 평가하였다.

최적의 앙상블멤버 구성은 다중모델, 다중물리, 그리고 하이브리드 기반의 앙상블 기법에 대한 정확도와 불확도를 비교분석하였다. 다중모델과 다중물리 앙상블 예측오차는 태풍의 북상에 대한 예측속도와 예측강도의 차이로 인해 발생했으며, 다중모델, 다중물리, 그리고 하이브리드 앙상블기법의 예측풍속에 대한 제공근오차가 각각 2.65, 6.56, 그리고 4.60m/s이고, 앙상블 스프레드가 각각 3.66, 0.79, 그리고 3.91m/s로 다중모델기반 앙상블 예측 풍속이 가장 정확하고 스프레드가 커서 태풍풍속예측에 대한 불확실성을 효율적으로 반영할 수 있는 것으로 확인되었다.

다중모델 중에서 주문생산 및 무료 자료수집이 가능한 수치모델 6종(KIER1, KIER2, KIER3, KMA-UM, KMA-WW3, 그리고 JMA-WW3)을 구성하여 태풍사례별 민감도를 분석하여 예측모델을 안정성(reliability)을 분석하였

다. 24시간 1일 예보(D+1)와 48시간 2일 예보(D+2)에 대한 제공근오차와 상관계수를 비교하였고 각각 예측성능의 임계값은 각각 3m/s, 0.65를 적용하였다. 태풍 블라벤에서는 KIER3의 48시간 예측풍속의 제공근오차가 임계값을 초과하였고, 태풍 덴빈과 산바에서는 KIER3, KMA-UM이 제공근오차와 상관계수가 임계값 범위를 벗어났다. 따라서 모든 태풍사례에서 안정적인 예측성을 보인 앙상블 멤버는 KIER1, KIER2 그리고 KMA-WW3였다.

기존 앙상블예측시스템^[4]의 앙상블멤버였던 KIER1, KIER2 외에 본 연구에서 새롭게 앙상블멤버로 추가한 것은 KMA-WW3이다. 새롭게 구축한 앙상블예측시스템의 예측풍속은 기존 시스템에서 예측된 풍속 대비 측정풍속과의 상관계수가 1.4% 그리고 일치도가 2.1% 높아 예측성능이 향상되었다. 따라서 다중모델, 다중물리, 그리고 하이브리드 앙상블 기법을 비교하고 앙상블멤버를 최적화하여 김진영등^[4]에서 구축한 기존시스템 대비 향상된 다중모델기반 앙상블을 구성하였다.

하지만 다중물리모델에서 단일 역학코어만을 고려하였기 때문에 다양한 역학코어에 대한 민감도 실험을 수행하고 앙상블예측시스템의 추가 멤버인 KMA-WW3에서 해석된 해수면 풍속의 변동추이를 장기간 검증하여 새로운 앙상블예측시스템을 지속적으로 개선·보완할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원 주요사업으로 수행한 결과입니다(GP2014 0030).

References

- [1] J.S. Lee, K.S. Kang, B.M. Park, Y.J. Won, B.G. Kim, N.S. Ahn, 2011, "A study on Current Status and Outlook of Offshore Wind Development in Korea, J. Sol. Energy Soc., **36**(1), 27-37.
- [2] H.-G. Kim, Y.-S. Lee, M.-S. Jang, M.-H. Kyong, 2006, "Development of the Wind Power Forecasting System, KIER Forecaster", New&Renewable Energy, **2**(2), 37-43.

- [3] KIER, 2013, “The Establishment of New and Renewable Energy Resource Map & Utilization System”.
- [4] J.-Y. Kim, H.-G. Kim, Y.-H. Kang, C.-Y. Yun, C.-K. Kim, J.-Y. Kim, J.-S. Lee, 2016, “A Simple Ensemble Prediction System for Wind Power Forecasting – Evaluation by Typhoon Bolaven Case –”, *J. Sol. Energy Soc.*, **36**(1), 27-37.
- [5] K.-B. Kim, Y.-H. Park, J.-K. Park, K.-N. Ko, J.-C. Huh, 2010, “Feasibility Study on Wind Power Forecasting Using MOS Forecasting Result of KMA”, in: Jones, G.S., Smith, R.Z. (eds.), “Introduction to the electronic age”, E-Publishing Ins, New York, 281-304.
- [6] ANEMOS, 2011, “Wind Power Predictions”, <http://www.windpowerprediction.com>.
- [7] ANEMOS.plus, 2011, “Advanced Tools for the Management of Electricity Grids with Large-Scale Wind Generation”, <http://www.anemos-plus.eu>.
- [8] Energy.gov, 2015, “Energy Department Announces \$2.5 Million to Improve Wind Forecasting”, <http://energy.gov/eere/articles/energy-department-announces-25-million-improve-wind-forecasting>.
- [9] IBM, 2013, “Made in IBM Labs: IBM Drives the Future of Renewable Energy with New Wind and Solar Forecasting System”, <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/41310.wss>.
- [10] Z. Janjic, 2003, “A Non-hydrostatic Model Based on a New Approach”, *Meteorol. Sol. Appl. Phy.* **82**(1), 271-285.
- [11] W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, J.G. Powers, 2008, “A Description of the Advanced Research WRF Version 3”, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Co., USA, p125.
- [12] Met Office, 2004, “Unified Model User Guide”, p243.
- [13] S.H. Yoo, J.-W. Seo, Y.-S. You, S. Park, Y.-H. Youn, 2006, “Comparison of with KMA Buoy Observation Results in the 2002-2005 year”, *Atmosph Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, G2, 1-7.
- [14] M. Ueno, N. Kohno, 2004, “The development of the third generation wave model MRI-III for operational use”, in *Proc.* 8p243.
- [15] Z.I. Janjic, 2002, “Nonsingular Implementation of the Mellor-Yanmada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model”, NCEP Office Note, Boulder, pp.61.
- [16] S.-Y. Hong, 2007, “Stable Boundary Layer Mixing in a Vertical Diffusion Scheme”, *J. Korea Meteor. Soc.*, Fall conference, Seoul, Korea, Oct. 25-26.
- [17] F. Chen, J. Dudhia, 2001, “Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation”, *Mon. Wea Rev.*, **129**, 569-585.
- [18] T.G. Smirnova, J.M. Brown, S.G. Benjamin D.Kim, 2000, “Parameterization of cold season processes in the MAPS land-surface scheme”, *J. Geophys. Res.*, **105**(D3), 4077-4086.
- [19] J. K. Lee, J.Y. Kim, K.Y. Oh, M.S. Ryu, J.S. Lee, 2011, “Integrated Measurement System for Offshore Meteorological Mast of Offshore Wind Farm”, *J. of Wind Energy*, **2**(1), 53-60.
- [20] G.-H. Ryu, D.-H. Kim, H.-W. Lee, S.-Y. Park, J.-W. Yoo, H.-G. Kim, 2016, “Accounting for the Atmospheric Stability in Wind Resource Variations and Its Impacts on the Power Generation by Concentric Equivalent Wind Speed”, *J. Sol. Energy Soc.* **36**(1), 49-61.
- [21] K. T. Tse, S. W. Li, J. C. H. Fung, 2014, “A comparative study of typhoon wind profiles derived from field measurements, meso-scale numerical simulations, and wind tunnel physical modeling”, *J. wind Eng. Ind. Aerodyn.* **131**, 46-58.