한국지형공간정보학회지 제20권 제3호 2012년 9월 pp. 19-27
연구논문
ISSN: 1598-2955
http://dx.doi.org/10.7319/kogsis.2012.20.3.019

한반도 시공간적 바람정보 생산과 토지피복별 보정 알고리즘 개발

Temporal and Spatial Wind Information Production and Correction Algorithm Development by Land Cover Type over the Republic of Korea

김도용* · 한경수**
Kim, Do Yong · Han, Kyung Soo

要 旨

바람은 기상, 기후, 신재생 에너지 등 다양한 분야에서 널리 활용되는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 이 연구에서는 우선, 중규모 기상모델 WRF를 이용하여 우리나라의 전역에 대하여 2006년도를 대상으로 수치 시뮬레이션을 수행하여, 시공간적 상세 바람정보를 생산하였다. 수치모의 된 풍속은 관측풍속과 비교하여 공간적 및 계절적 특징을 비교적 잘 나타내었으나, 전반적으로 다소 과대 모의되는 경향을 보였다. 이러한 예측오차를 줄이기 위하여, 위성원격탐사로부터 생산된 지표특성 변수인 LST와 NDWI를 사용한 예측풍속의 통계적 보정 알고리즘을 개발하고, 다중회귀분석에 의하여 보정식의 토지피복별 상수와 계수를 도출하였다. 제안된 보정 알고리즘에 의하여 최종적으로 보정된 풍속은 관측풍속과 비교하여 높은 상관관계, 0.4 m/s 미만의 RMSE, 0에 가까운 BIAS로 매우 높은 일치성을 보였다. 따라서, 이 연구에서 제안한 위성원격탐사자료를 활용한 통계적 보정 알고리즘은 중규모 수치모의에 의한 예측오차를 개선하고 보다 정확한 한반도 바람정보를 생산하는데 있어서 간략하고 유용한 수단이 될 수 있으리라 기대된다.

핵심용어 : 바람, 수치모의, 토지피복, LST, NDWI, 보정 알고리즘

Abstract

Wind is an important variable for various scientific communities such as meteorology, climatology, and renewable energy. In this study, numerical simulations using WRF mesoscale model were performed to produce temporal and spatial wind information over the Republic of Korea during 2006. Although the spatial features and monthly variations of the near-surface wind speed were well simulated in the model, the simulated results overestimated the observed values as a whole. To correct these simulated wind speeds, a regression-based statistical algorithm with different constants and coefficients by land cover type was developed using the satellite-derived LST and NDWI. The corrected wind speeds for the algorithm validation showed strong correlation and close agreement with the observed values for each land cover type, with nearly zero mean bias and less than 0.4 m/s RMSE. Therefore, the proposed algorithm using remotely sensed surface observations may be useful for correcting simulated near-surface wind speeds and producing more accurate wind information over the Republic of Korea.

Keywords : Wind, Numerical Simulation, Land Cover Type, LST, NDWI, Correction Algorithm

1. 서 론

바람은 일기예보뿐만 아니라 기후, 수문, 농림, 교통, 산업, 방재, 생활안전 등 각 종 분야에서 널리 활용되는 매우 중요한 기상요소 중 하나이다. 특히, 최근에는 지구온난화와 기후변화가 인류의 생존을 위협하는 글로벌 이슈로 대두되면서, 친환경형 신재생 에너지 중 하나인 바람자원(풍력에너지)의 개발과 보급에 대한 관심이 높아지고 있다(Burlando et al., 2009; Liu et al., 2010). 그뿐만 아니라, 석유, 석탄, 천연가스 등 부존자원량의 부족과 고유가 시대의 도래로 인하여 대체 에너지 확보 문제는 매우 중요한 문제로 부각되었고, 이 중 풍력에너지는 가장 효율적으로 접근할 수 있는 차세대 에너지원으로 각광받고 있다(이수갑, 2005). 유럽과

2012년 5월 23일 접수, 2012년 7월 26일 채택
* 정회원 · 부경대학교 BK21 지구환경시스템사업단 연구교수(ryuoasis@gmail.com)
** 교신저자 · 부경대학교 환경해양대학 공간정보시스템공학과 부교수(kyuon-soo.han@pknu.ac.kr)

미국의 경우는 풍력 에너지의 개발 및 보급이 실용화·활성화 단계에 들어섰으며(변재영 등, 2010), 최근 들어 중국 및 인도를 중심으로 아시아에서의 풍력시장이 급팽창 하고 있는 것으로 보인다(장문석과 방형준, 2009). 우리나라의 경우도 고유가, 자원, 환경, 식량 등의 인류공동 문제 대응 강화 정책의 일환으로 태양, 풍력, 바이오 등 신재생 에너지 기술을 중점육성기술로 분류하고 있으며, 풍력 에너지 개발 및 보급을 위한 지속적인 노력을 경주하고 있다(김기홍 등, 2010).

풍력에너지의 효율적 확보를 위해서는 풍력발전소의 최적 위치 선정과 타당성 조사 등이 선행되어야 한다. 이 때, 정확하고 상세한 바람정보는 매우 중요한 역할을 한다. 일반적으로 바람정보는 유인기상관측소(Meteorological Station), 자동기상관측소(Automatic Weather System, AWS), 고층기상관측소(Radiosonde Site) 등의 관측정보로부터 획득한다. 그러나, 우리나라는 국토면적이 비교적 좁으며 국토의 68%가 산악지형이고 삼면이 바다에 접해 있어 매우 복잡하고 다양한 국지적 기상현상이 나타나기 때문에, 관측자료 만으로는 공간적 바람특성을 상세히 평가하기 어렵다(김현구 등, 2008; 이순환 등, 2009). 이에 대한 대처방안으로 근거리 관측자료 간의 공간적 내삽 등의 통계적 방법에 의한 바람정보 추정기법이 있으나(Damousis et al., 2004; Sideratos and Hatziargyriou, 2007; Salcedo-Sanz et al., 2009), 이 방법은 지형과 지표 특성에 따른 바람의 다변성을 고려하지 못한다(변재영 등, 2010). 최근에는 중규모 기상모델을 이용하여 복잡지형과 불균질한 지표 특성 등을 고려한 3차원 상세 바람정보 예측 및 이를 이용한 바람자원지도 생산이 이루어지고 있으나(이순환 등, 2009; Storm et al., 2009; 변재영 등, 2010; Kim et al., 2010), 공간적으로 상이하게 나타나는 예측 오차를 개선하고 정확도를 향상시키기 위한 꾸준한 노력이 필요한 실정이다.

이 연구에서는 중규모 기상모델을 이용하여 우리나라의 시공간적 바람정보를 생산하고, 예측된 풍속의 통계적 보정을 시도하였다. 또한, 대상지역의 지표특성을 고려하기 위하여 위성원격탐사자료로부터 생산된 토지피복정보를 예측풍속 보정에 활용하였다. 이를 통하여, 보다 정확한 한반도 바람정보 생산을 위한 유용한 방안을 제시하고, 그뿐만 아니라 위성원격탐사자료의 활용성 확대를 도모하고자 한다. 이 논문은 총 4장으로 구성되며, 연구의 배경 및 필요성에 대하여는 상기에서 이미 서술하였으며, 제2장에서는 이 연구에 사용된 중규모 기상모델과 시뮬레이션을 위한 실험설계, 그리고 지상관측자료 및 위성원격탐사자료 등에 대하여 서술한다. 제3장에서는 이 연구에서 수행된 한반도 풍속의 수치모의 결과를 관측 자료와 비교·분석하고, 또한 예측결과를 보정하기 위하여 위성원격탐사자료를 활용한 통계적 알고리즘을 개발하고 검증한다. 마지막으로 제4장에서는 요약 및 결론, 그리고 향후 연구방향에 대하여 서술한다.

2. 연구방법

중규모 기상모델은 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 WRF(Weather Research and Forecasting) version 3.3을 이용한다(http://www.wrf-model.org). 이 모델은 다중 둥지격자 구성이 가능하여 중규모 및 국지규모 기상현상을 모의하기에 적합하며, 최근 대기과학 분야에서 연구 및 현업용으로 널리 활용되고 있는 대표적인 중규모 기상모델이다(Skamarock et al., 2008; Hong et al., 2010; Wang et al., 2011). 따라서 이 연구에서는 이러한 기존 연구들을 참고하여 수치실험을 구성하였다. WRF는 비정역학 모델로 Arakawa-C 수평격자와 지형-정압 연직좌표로 구성되어 있으며, 모델의 시간 적분은 Runge-Kutta second-to third-order로 하였다. 물리해석방법으로는 WSM3(WRF single-moment three-class microphysics) 아격자 규모 미세물리 모수화법(Hong et al., 2004), KF(Kain-Fritsch Eta convection scheme) 적운 모수화법(Kain and Fritsch, 1993), YSU(Yonsei University scheme) 대류경계층 모수화법(Hong et al., 2006), Monin-Obukhov 상사이론에 의한 지표층 모수화 및 열확산 지면모델(Dudhia, 1996), Dudhia 단파복사 모수화법(Dudhia, 1989), RRTM(Rapid Radiative Transfer Model) 장파복사 모수화법(Mlawer et al., 1997)을 사용하였다.

이 연구에서는 동아시아 영역(Figure 1(a))과 한반도 영역(Figure 1(b))으로 둥지격자계를 구성하고, 다운스케일링 기법에 의하여 한반도 영역의 바람을 모의하였다(Oh et al., 2004; Kim et al., 2009). 수평해상도는 연구실 규모의 전산자원을 고려하여, 동아시아 영역의 경우는 30 km, 한반도 영역의 경우는 10 km로 설정하였다. 이에 따른 격자수(x grid × y grid)는 각각 동아시아 영역이 131×141, 한반도 영역이 91×85이다. 연직층은 모델 최상단을 50 hPa로 두고 28개 층으로 설정하였다. WRF 모델의 초기 및 경계조건으로는 미국 NCEP/DOE(National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy)의 AMIP-II(Atmospheric Model Inter-comparison Project II) 재분석 자료(대기: 2.5° 등

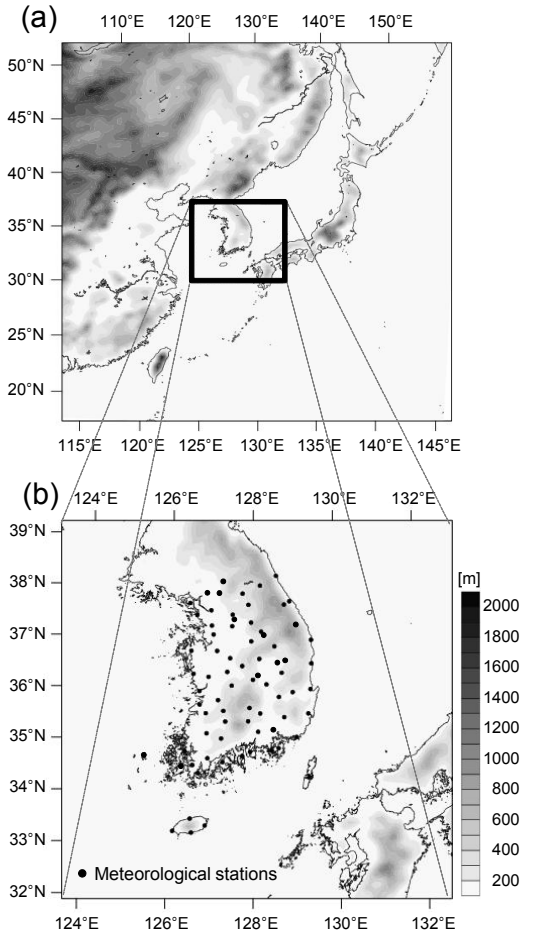

Figure 1. Experimental domains over (a) East Asia and (b) the Republic of Korea

격자, 지표: T62 해상도)와 OISST(optimal interpolation Sea Surface Temperature) (1° 등격자 해상도)자료를 사용하였다. WRF 수치모의는 지상관측자료와 위성원격탐사자료가 확보된 2006년도 1년간에 대하여 실시하였다.

이 연구에서는 Figure 1(b)에 흑점으로 표시된 우리나라의 74개 유인기상관측소로부터 얻어진 분석 대상기간(2006년) 동안의 지상관측 풍속자료를 사용하여, WRF 수치모의 결과를 검증하였다. 또한, 지상관측자료와 시공간적으로 매치(match)된 위성원격탐사자료를 사용하여(Zhao et al., 2002; Darecki and Stramski, 2004; Yu et al., 2009), 예측 풍속의 보정 알고리즘을 개발하고, 수치모의 결과를 보정하였다. 위성원격탐사자료로는 지표면 특성을 나타내는 대표적인 요소인 토지피복, 온도, 습도 정보에 해당하는 Terra/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers)의 토지피복자료와 LST(Land Surface Temperature), 그리고 SPOT/VGT(VEGETATION) S10(10-day)으로부터 생산된 NDWI(Normalized Difference Water Index)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 WRF 수치모의 결과 및 검증

이 연구에서는 기상관측소의 바람 관측높이를 고려하여, 지상 10 m 바람에 대하여 고찰한다. 우선, WRF로부터 수치모의 된 한반도 연평균 풍속의 공간분포를 Figure 2(a)에 나타내었다. 일반적으로 지표 부근의 바람은 지형의 영향을 많이 받는다. 서론에서 기술하였듯이 우리나라는 삼면이 바다로 둘러 쌓여있는 반도이며, 산악지형이 차지하는 면적이 많다. 따라서 해륙풍과 산곡풍이 잘 발달하는 연안, 도서, 산악지역 등에서 풍속이 강하게 나타나며, 내륙지역은 상대적으로 약한 풍속분포를 보였다. 이러한 수치모의 결과를 검증하기 위하여, 각 관측지점에서의 관측풍속과 그 지점에 해당하는 WRF 격자에서의 예측풍속에 대한 산포도를 Figure 2(b)에 나타내었다. 통계분석 요소로는 상관계수(CORR), 제곱근-평균-제곱 오차(RMSE), 평균편차(BIAS)를 사용하였다. 수치모의 된 연평균 풍속은 관측값과 비교하여 매우 높은 상관(CORR=0.89)을 보였고, RMSE와 BIAS는 각각 0.33 m/s와, 0.57 m/s로 계산 되었다. 그러나, 점선으로 표시된 일대일 대응선을 기준으로 보면, 대부분의 관측지점에서 다소 과대모의 되는 경향이 있음을 알 수 있다. 실제로 한반도 전체의 연평균 풍속의 관측값은 약 2.0 m/s인데 비해, WRF 예측값은 약 2.5 m/s로 0.5 m/s정도 과대 평가 되었다.

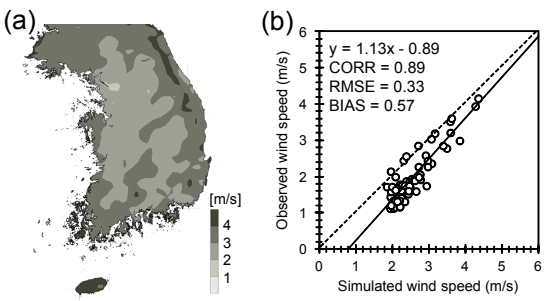

Figure 2. (a) Distribution of the simulated annual mean wind speed and (b) scatterplot of the observed versus simulated wind speeds

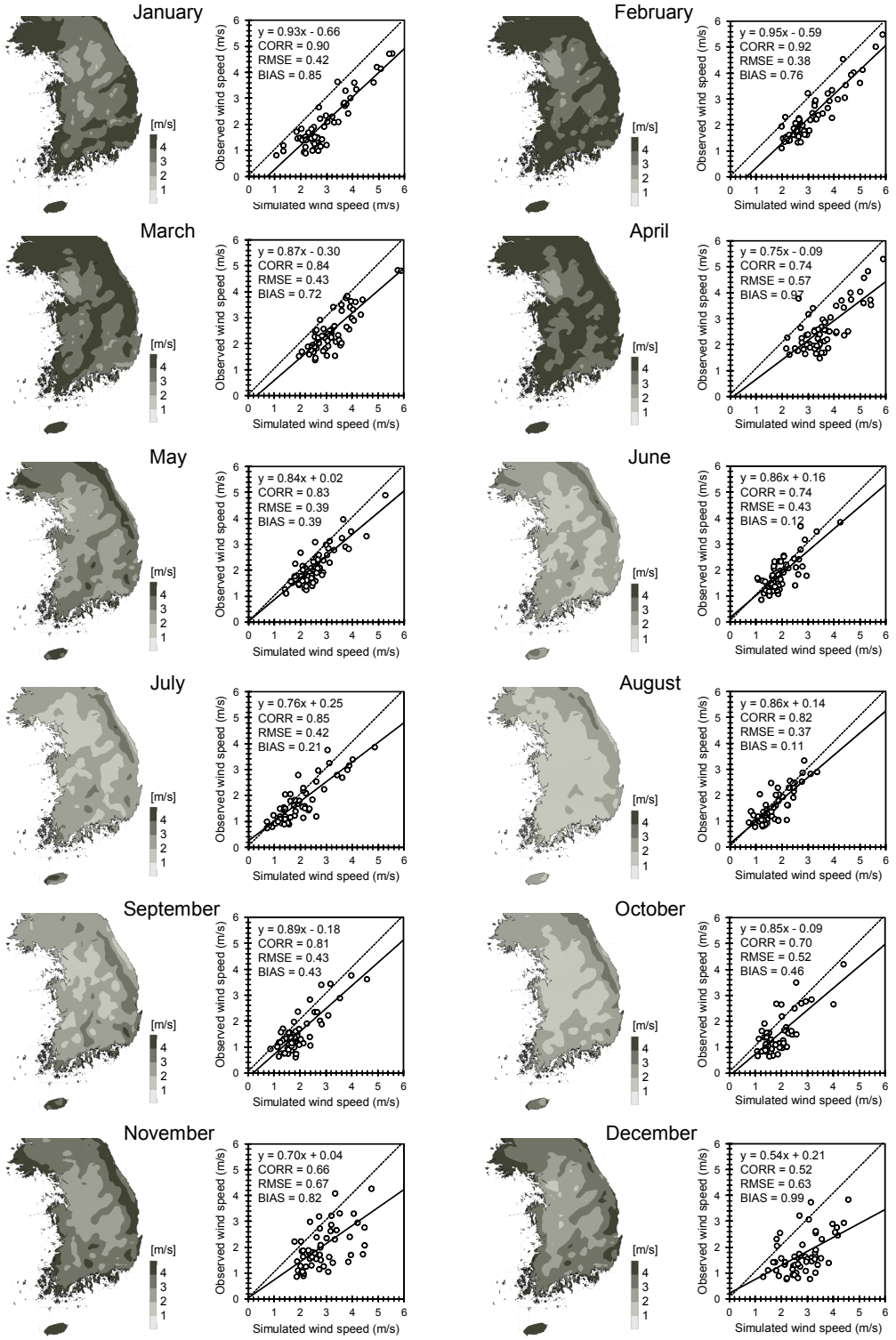

Figure 3. Distributions of the simulated monthly mean wind speed and scatterplots of the observed versus simulated wind speeds

다음으로 한반도 바람의 시공간적 양상을 알아보기 위하여 월별 평균풍속을 분석하였다. Figure 3은 WRF로부터 수치모의 된 한반도 월별(1월~12월) 평균 풍속의 공간분포와 그 검증 결과를 나타낸다. 월별 평균풍속의 공간적 특징은 Figure 2에 보인 연평균 풍속의 경우와 마찬가지로, 연중 연안, 도서, 산악지역에서의 풍속이 내륙지역보다 강하게 나타났다. 시간적 변화 양상으로는 겨울과 이른 봄철에 해당하는 11월~12월, 1월~4월에 강한 풍속 분포를 보였으며, 여름철을 포함하는 5월~10월에는 상대적으로 약한 풍속 분포를 보였다. 즉, 우리나라는 대륙성한대기단인 시베리아 기단의 영향을 받는 겨울철에 풍황이 우수한 것으로 나타났다.

이러한 WRF로부터 생산된 월평균 풍속을 관측값과 비교 · 검증하여, 그 결과를 Figure 3의 각 월별 공간분포도의 우측에 나타내었다. 관측풍속 역시 여름철에는 대부분 약 1.0~3.0 m/s의 약한 풍속 분포를 보였으며, 겨울철에는 그 이상의 강한 풍속을 보이는 지점이 많았다. 전반적으로 수치모의 된 월평균 풍속은 관측값과 비교하여 높은 상관을 보였다. RMSE와 BIAS는 1.0 m/s 이하의 값을 보였으나, 풍속이 약한 여름철 보다 풍속이 강한 겨울철에 RMSE와 BIAS가 상대적으로 큰 수치를 보였다. 또한, 연평균 풍속의 경우와 마찬가지로, WRF 예측값이 관측값과 비교하여 다소 과대 모의되는 경향은 모든 월에서 나타났으며, 풍속이 강한 시즌에 더욱 뚜렷하였다.

바람은 다양한 기상, 기후, 지리학적 요소에 의하여 영향을 받는데, 특히 국지적 바람은 대상지역의 지형과 지표특성에 영향을 많이 받는다. 이 연구에서는 한반도 전역을 대상으로 1년간 수치모의 실험을 수행하였기에, 수평해상도를 10 km로 제한하였다. 이에 따라, 상세한 지형과 지표특성이 정확히 반영되지 못하여, 실제 관측값과 비교하여 오차가 발생한 것으로 사료된다. 이러한 수치모의에 의한 오차를 줄이기 위하여 최근에는 더욱 상세한 지형과 지표 특성 등을 고려한 고해상도 수치실험이 이루어지고 있으며(이순환 등, 2009), 국립기상연구소에서는 이 연구에서 사용한 중규모 기상모델과 동일한 WRF를 이용한 1 km × 1 km 수평공간해상도의 바람지도를 생산하여 제공하고 있다(http://www.greenmap.go.kr/). 그러나 고해상도 수치모의에 의한 예측 정확도 향상을 위해서는 수 백 또는 수 십 m의 초고해상도의 실험 설계가 필요하며(변재영 등, 2010), 또한 한반도 전역을 대상으로 한 초고해상도 수치모의를 위해서는 무엇보다도 막대한 계산량을 감당할 수 있는 충분한 전산자원의 확보가 전제되어야 한다는 한계성이 있다.

3.2 보정 알고리즘 개발 및 검증

여기에서는 상기에서 지적한 한계성을 극복하고자, 예측 풍속의 통계적 보정 알고리즘을 개발하고 검증하였다. 또한, 대상지역의 지표특성을 최대한 반영하여 예측 오차를 최소화 하고자, 위성원격탐사자료로부터 생산된 토지피복정보(토지피복자료, LST, NDWI)를 활용하였다. 따라서 관측지점을 토지피복별로 분류하고, 위성원격탐사자료로부터 산출된 지표면 온도와 습도의 정보인 LST와 NDWI를 사용하여 토지피복별 예측풍속을 다중회귀분석에 의하여 보정하였다. 먼저, 이 연구에서 대상으로 한 74개 유인기상관측소의 위•경도 정보로부터 각 관측지점의 MODIS 토지피복정보를 조사하고, 관측소들을 토지피복별로 분류하였다. 총 74개 관측소 중 16%가 혼합림(mixed Forests), 30%가 농지(croplands), 45%가 시가화 지역(urban and built-up)이었고, 기타 토지피복이 9%를 차지했다. 따라서, 이 연구에서는 총 관측지점의 90%이상에 해당하는 혼합림, 농지, 시가화 지역의 3종류의 토지피복을 대상으로 하였다. 또한, 시간 또는 일평균 풍속은 그 변동성이 너무 커서 예측 오차가 시공간적으로 매우 상이하기 때문에, 한반도 전역에 대한 1년간의 바람정보를 대상으로 하는 이 연구에서는 월평균 풍속에 대하여 보정을 시도하였다.

Figure 4는 월평균 풍속의 토지피복별((a)혼합림, (b)농지, (c)시가화 지역) WRF 예측값과 관측값의 산포도를 나타낸다. 상관관계는 전반적으로 좋았으며, 특히 Figure 4(a)에 보인 혼합림의 경우 CORR=0.85로 가장 높은 상관을 보였다. RMSE는 0.5 m/s 전후의 값을 보였고, BIAS도 1.0 m/s를 넘지 않는 범위에 있었다. 그러나, 토지피복별 분류에 있어서도 여전히 WRF의 예측결과가 모든 토지피복의 경우에 대하여 관측값과 비교하여 전반적으로 과대 모의하는 경향을 보였다.

이 연구에서는 Figure 4에 보인 토지피복별 월평균 풍속을 보정하기 위하여, 토지피복별 자료의 무작위 75%를 사용하여 회귀 알고리즘을 개발하고, 나머지 25%자료를 사용하여 검증하였다. WRF 예측풍속을 보정하기 위한 다중회귀식은 다음과 같다.

$$WS = a + (b_1 \cdot WRF) + (b_2 \cdot LST) + (b_3 \cdot NDWI) \quad (1)$$

여기서, 독립변수는 WRF 예측풍속, LST, NDWI이고, a는 회귀 상수, b_1, b_2, b_3는 각 독립변수에 대응하는 계수이다. WS는 종속변수로써 이들에 의해 계산(보정)되는 풍속이다. WRF, LST, NDWI는 기 확보된 주

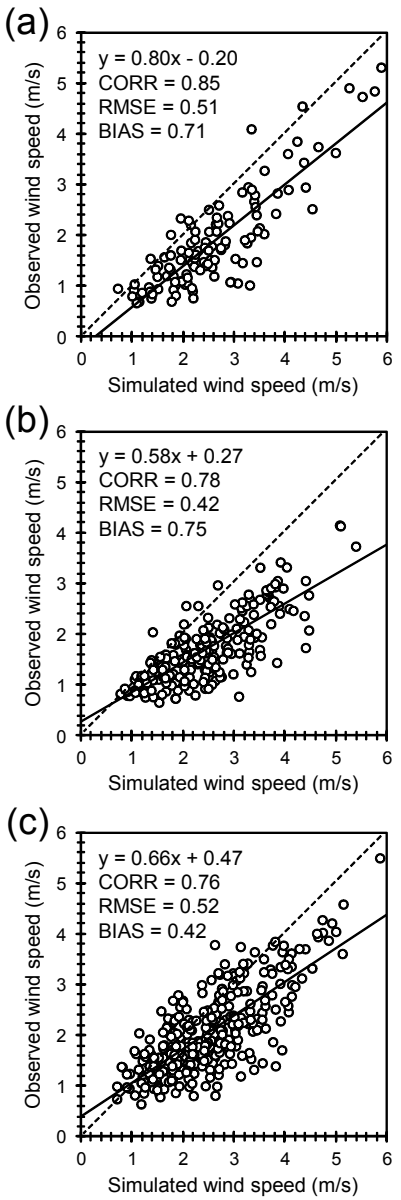

Figure 4. Scatterplots of the observed versus simulated monthly mean wind speeds for (a) mixed forests, (b) croplands, and (c) urban and built-up

Table 1. Constants and regression coefficients in Eq. (1)

Land Type	a	b_1	b_2	b_3
Mixed Forests	-0.609	0.879	0.005	1.502
Croplands	-0.396	0.713	0.015	0.629
Urban & Built-up	-0.130	0.727	0.019	-0.702

어지는 값이므로, 조건에 따른 각 상수와 계수를 알면, 최종적으로 WS를 산출할 수 있다. 따라서, 토지피복별 상수와 계수를 도출하기 위하여, 다중회귀분석을 실시하였다. 이때, WS는 기상관측소에서 측정된 관측풍속을 대입한다. 이를 통하여, 도출된 토지피복별 상수와 계수는 Table 1과 같다.

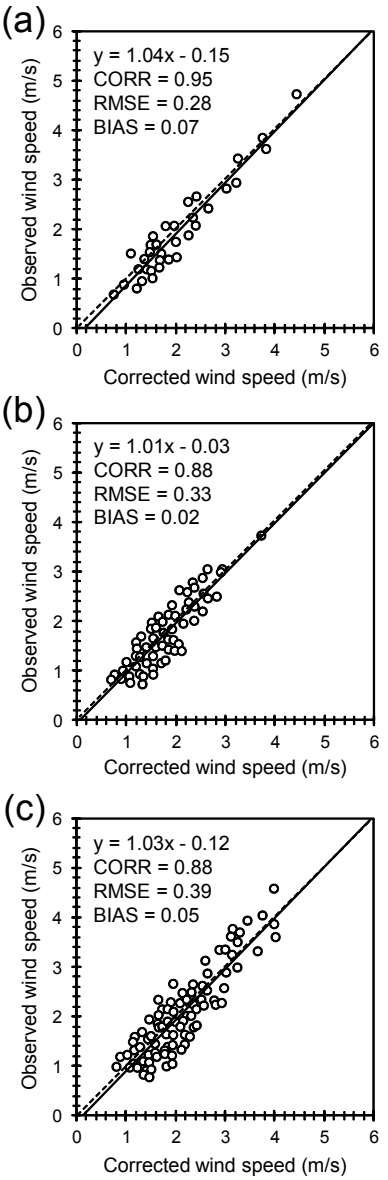

Figure 5. Scatterplots of the observed versus corrected monthly mean wind speeds for (a) mixed forests, (b) croplands, and (c) urban and built-up

마지막으로, Eq. (1)의 회귀 알고리즘을 검증하기 위하여, 나머지 25%의 자료로부터 각 독립변수를 대입하고, Table 1에 보인 상수와 계수를 사용하여 토지피복별 WS를 산출하였다. 산출된 WS, 즉 보정된 풍속값은 관측값과 비교•검증하여, 그 결과를 Figure 5에 나타내었다. 대상으로 한 3종류의 토지피복, (a)혼합림, (b)농지, (c)시가화 지역에 대하여 상관계수는 각각 0.95, 0.88, 0.88로 회귀 알고리즘에 의해 보정된 풍속은 관측풍속과 매우 높은 상관을 보였다. 또한, RMSE는 0.4 m/s 미만이었으며, BIAS는 0.1 m/s 미만이었다. 특히, 최적적합직선(추세선)은 그 기울기가 약 1이었고, y 절편은 0에 가까운 값으로, 점선으로 표시된 일대일 대응선과 거의 일치하였다. 결과적으로, WRF에 의해 수치모의 된 예측풍속은 위성원격탐사에 의한 지표면 관측자료를 사용한 통계적 보정식에 의하여 매우 잘 보정되었음을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 중규모 기상모델 WRF를 이용하여 우리나라의 시공간적 바람정보를 생산하고, 생산된 바람정보가 갖는 예측오차를 줄이기 위하여 위성원격탐사자료를 활용하여 수치모의 된 풍속의 통계적 보정을 시도하였다.

우선, 한반도 전역에 대하여 2006년 1년 동안 수치시뮬레이션을 수행하고, 모의된 풍속을 관측풍속과 비교하여 검증하였다. WRF는 지형의 영향을 받는 바람의 공간적 특성을 잘 모의하였으며, 또한, 겨울과 이른 봄철에 풍황이 우수한 우리나라 바람의 계절적 특징도 비교적 잘 모의하였다. 그러나, 전반적으로 수치모의 된 풍속은 관측풍속과 비교하여 다소 과대 모의되는 경향을 보였다. 다음으로, 위성원격탐사로부터 생산된 LST와 NDWI를 사용하여 지표특성을 반영한 예측풍속의 통계적 보정을 시도하였다. WRF 예측풍속과 위성원격탐사자료를 독립변수로 한 보정식을 제안하고, 다중회귀분석에 의하여 토지피복별 상수와 계수를 도출하였다. 제안된 보정 알고리즘을 검증한 결과, 보정식에 의하여 최종적으로 보정된 풍속은 관측풍속과 비교하여 높은 상관관계를 보였고, 또한 0.4 m/s 미만의 RMSE와 0에 가까운 BIAS로 매우 높은 일치성을 보였다.

결론적으로, 한반도 3차원 상세 바람정보를 생산하는데 있어서 중규모 기상모델을 이용한 수치모의는 매우 유용하나 그 정확도 향상을 위해서는 보다 많은 노력이 필요하다. 이러한 관점에서 이 연구에서 제안한 위성원격탐사자료를 활용한 통계적 보정 알고리즘은 수치모의에 의한 오차를 개선하고 보다 정확한 한반도 바람정보를 생산하는데 있어서 간략하고 유용한 수단이 될 수 있으리라 기대된다. 지금까지의 원격탐사자료를 이용한 바람에 대한 연구는 대부분 해상에 대하여 이루어져 왔고(김현구 등, 2005; Xu et al., 2010; Bentamy and Fillon, 2012), 한반도 전역을 대상으로 한 바람 보정에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서, 이 연구는 위성원격탐사자료의 활용성 확대의 측면에서도 의미가 있다고 사료된다. 마지막으로, 이 연구에서는 월평균 풍속에 대한 보정을 시도하였으나, 다음 연구에서는 일평균 풍속을 보정할 수 있는 방안을 강구하고자 한다. 이와 더불어 보다 다양한 인자들에 대한 보정 및 민감도 분석이 수행되어, 주요 인자를 결정할 수 있는 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-2066)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김기홍, 윤준희, 김백석, 2010, 강원도 기상데이터를 이용한 풍속 지도 제작, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제18권, 1호, pp. 31-39.
2. 김현구, 장문석, 이은정, 2008, 제주도 풍력자원 데이터베이스 구축을 위한 기상통계분석, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, 제17권, 6호, pp. 591-599.
3. 김현구, 최재우, 이화운, 정우식, 2005, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구: I. 원격탐사자료자료에 의한 종관바람지도 구축, 한국신재생에너지학회지, 한국신재생에너지학회, 제1권, 1호, pp. 44-53.
4. 변재영, 최영진, 서범근, 2010, 중규모 모델 WRF로부터 모의된 한반도 풍력-기상자원 특성, 대기, 한국기상학회, 제20권, 2호, pp. 195-210.
5. 이수갑, 2005, 풍력발전의 기술현황 및 전망, 한국신재생에너지학회지, 한국신재생에너지학회, 제1권, 1호, pp. 15-23.
6. 이순환, 이화운, 김동혁, 김민정, 김현구, 2009, 한반도 풍력 자원 지도의 공간 해상도가 풍력자원 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, 제18권, 8호, pp. 885-897.
7. 장문석, 방형준, 2009, 풍력발전기술의 현황과 전망, 한국환경과학회지, 한국환경과학회, 제18권, 8호, pp. 933-940.

8. Bentamy, A. and Fillon, D.C., 2012, Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements, International Journal of Remote Sensing, Taylor & Francis, Vol. 33, No. 6, pp. 1729-1754.
9. Burlando, M., Podesta, A., Villa, L., Ratto, C.F. and Cassulo, G., 2009, Preliminary estimate of the large-scale wind energy resource with few measurements available: The case of Montenegro, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Ltd., Vol. 97, No. 11-12, pp. 497-511.
10. Damousis, I.G., Alexiadis, M.C., Theocharis, J.B. and Dokopoulos, P.S., 2004, A fuzzy model for wind speed prediction and power generation in wind parks using spatial correlation, IEEE Transactions on Energy Conversion, IEEE PES, Vol. 19, No. 2, pp. 352-361.
11. Darecki, M. and Stramski, D., 2004, An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea, Remote Sensing of Environment, Elsevier Inc., Vol. 89, No. 3, pp. 326-350.
12. Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, Journal of the Atmospheric Sciences, AMS, Vol. 46, No. 20, pp. 3077-3107.
13. Dudhia, J., 1996, A multi-layer soil temperature model for MM5, 6th Annual PSU/NCAR Mesoscale Model (MM5) Users Workshop, Pennsylvania State University, Boulder, CO, USA.
14. Hong, S.-Y., Dudhia, J. and Chen, S.-H., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation, Monthly Weather Review, AMS, Vol. 132, No. 1, pp. 103-120.
15. Hong, S.-Y., Moon, N.-K, Lim, K.-S. and Kim, J.-W., 2010, Future climate change scenarios over Korea using a multi-nested downscaling system: A pilot study, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, KMS, Vol. 46, No. 4, pp. 425-435.
16. Hong, S.-Y., Noh, Y. and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, Monthly Weather Review, AMS, Vol. 134, No. 9, pp. 2318-2341.
17. Kain, J.S. and Fritsch, J.M., 1993, Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models, edited by K.A. Emanuel and D.J. Raymond, American Meteorological Society, Boston, MA, USA. 246pp.
18. Kim, D.-H., Lee, H.-W. and Lee, S.-H., 2010, Evaluation of wind resource using numerically optimized data in the southwestern Korean Peninsula, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, KMS, Vol. 46, No. 4, pp. 393-403.
19. Kim, D.-Y., Oh, J.-H., Kim, J.-Y., Sen, P. and Kim, T.-K., 2009, An attempt of estimation of annual fog frequency over gyeongsangbuk-do of Korea using weather generator MM5, Environmental Engineering Research, KSEE, Vol. 14, No. 2, pp. 88-94.
20. Liu, H., Tian, H.-Q., Chen, C. and Li, Y.-F., 2010, A hybrid statistical method to predict wind speed and wind power, Renewable Energy, Elsevier Ltd., Vol. 35, No. 8, pp. 1857-1861.
21. Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono M.J. and Clough, S.A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave, Journal of Geophysical Research, AGU, Vol. 102, No. D14, pp. 16663-16682.
22. Oh, J.-H., Kim, T., Kim, M.-K., Lee, S.-H., Min S.-K. and Kwon, W.-T., 2004, Regional climate simulation for Korea using dynamic downscaling and statistical adjustment, Journal of the Meteorological Society of Japan, MSJ, Vol. 82, No. 6, pp. 1629-1643.
23. Salcedo-Sanz, S., Pérez-Bellido, Á.M., Ortiz-García, E.G., Portilla-Figueras, A., Prieto, L. and Paredes, D., 2009, Hybridizing the fifth generation mesoscale model with artificial neural networks for short-term wind speed prediction, Renewable Energy, Elsevier Ltd., Vol. 34, No. 6, pp. 1451-1457.
24. Sideratos, G. and Hatziargyriou, N.D., 2007, An advanced statistical method for wind power forecasting, IEEE Transactions on Power Systems, IEEE PES, Vol. 22, No. 1, pp. 258-265.
25. Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J.G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA, 125pp.
26. Storm, B., Dudhia, J., Basu, S., Swift, A. and Giammarco, I., 2009, Evaluation of the weather research and forecasting model on forecasting low-level jets: Implications for wind energy, Wind Energy, John Wiley & Sons, Ltd., Vol. 12, No. 1, pp. 81-90.
27. Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill,

D., Lin, H.-C., Michalakes, J., Rizvi, S. and Zhang, X., 2011, Weather Research & Forecasting, ARW version 3 modeling system user's guide, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.

28. Xu, Q., Lin, H., Li, X., Zuo, J., Zheng, Q., Pichel, W.G. and Liu, Y., 2010, Assessment of an analytical model for sea surface wind speed retrieval from spaceborne SAR, International Journal of Remote Sensing, Taylor & Francis, Vol. 31, No. 4, pp. 993-1008.
29. Yu, Y., Tarpley, D., Privette, J.L., Goldberg, M.D., Raja, M.K.R.V., Vinnikov, K.Y. and Xu, H., 2009, Developing algorithm for operational GOES-R land surface temperature product, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE GRSS, Vol. 47, No. 3, pp. 936-951.
30. Zhao, T.X.-P., Stowe, L.L., Smirnov, A., Crosby, D., Sapper, J. and Mcclain, C.R., 2002, Development of a global validation package for satellite oceanic aerosol optical thickness retrieval based on AERONET observation and its application to NOAA/NESDIS operational aerosol retrievals, Journal of the Atmospheric Sciences, AMS, Vol. 59, No. 3, pp. 294-312.