

# 중규모 모델 WRF로부터 모의된 한반도 풍력-기상자원 특성

변재영\* · 최영진 · 서범근

국립기상연구소, 기상청

(2010년 3월 29일 접수; 2010년 5월 26일 승인)

## Characteristics of a Wind Map over the Korean Peninsula Based on Mesoscale Model WRF

Jae-Young Byon, Young-Jean Choi and Beom-Keun Seo

National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration

(Manuscript received 29 March 2010; in final form 26 May 2010)

### Abstract

This study uses mesoscale model WRF to investigate characteristics of wind fields in South Korea, a region with a complex terrain. Hourly wind fields were simulated for one year representing mean characteristics of an 11-year period from year 1998 to year 2008. The simulations were performed on a nested grid from 27 km down to 1 km horizontal resolution. Seasonal variation of wind speed indicates that wind is strongest during the spring and winter seasons. Spatial distribution of mean wind speed shows wind energy potential at its peak in mountainous region of Gangwon-do, the east coast, and Jeju Island. Wind speed peaks at night in mountainous and eastern coastal regions, and in the afternoon inland and in the southwestern coastal region. The simulated wind map was verified with four upper-air sounding observations. Wind speed was shown to have a more pronounced overestimation tendency relative to observation in the winter rather than summer. The results of this wind mapping study help identify locations with the highest wind energy potential in South Korea.

**Key words:** Wind map, meoscale model, WRF, wind energy

### 1. 서론

기후변화 시나리오에 따르면 지구온난화는 지속적으로 증가될 것으로 보고되고 있으며, 기후변화의 주요인은 이산화탄소와 같은 온실가스이다(IPCC, 2007). 따라서 지구온난화 방지를 위한 온실가스 감축을 목표로 하는 교토의정서 발표 후 선진국에서는 온실가스 배출량을 2012년까지 1990년 대비 평균 5.2%, 2020년까지 20%이상 감축하는 목표를 세우고 있다. 우리나라

에서도 2005년 대비 4% 감축하는 목표를 가지고 있다. 우리나라의 온실가스 배출량은 OECD 국가중 6위이며, 배출량 증가율은 1위이다.

온실가스 감축을 위해서는 화석연료를 대체하는 대체에너지 개발이 필요하며 풍력에너지와 같은 신재생 에너지가 하나의 해결 수단이 될 수 있다. 선진국에서는 친환경 정책으로 신재생 에너지 비율을 증가시키고 있다. 독일에서는 현재의 14% 비율을 30%로 향상하며, 영국과 프랑스에서도 2020년까지 신재생 에너지 비율을 15%, 20%로 확대할 계획이다. 일본에서는 2025년까지 신재생 에너지 비율을 25%까지 증가시키고, 우리나라에서도 신재생 에너지 보급률을 2011년까지 5%, 2030년까지 11%로 달성한다는 목표하에 사업을 추진하고 있다(김성은 등, 2008).

신재생에너지 중 풍력발전은 무공해, 무한정의 바람을 이용하며, 환경친화적이다. 기술적인 측면에서

\*Corresponding Author: Jae-Young Byon, Applied Meteorological Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, 460-18 Shindaebang-dong Dongjak-gu, Seoul 156-720 South Korea.

Phone: +82-2-6712-0453, fax: +82-2-835-5922  
E-mail: byonjy@kma.go.kr

도 성속도가 가장 높으며, 발전 단가는 가장 낮아 화력 발전과 필적할만한 경제성을 가진다. 현재의 풍력 에너지 생산단가는 전통적인 에너지 단가보다 높다. 그러나 2013년을 기준으로 풍력에너지 생산 기술 향상, 화석연료의 고갈 등에 따라 풍력에너지의 생산 단가는 전통적인 에너지 단가보다 낮아질 것으로 기대되고 있다. 따라서 유럽, 미국 등 많은 나라에서는 풍력개발 및 보급이 활성화 단계에 있으나 한국의 풍력 발전 보급은 초기 단계이다.

풍력사업의 활성화를 위해서는 상세하고 정확한 풍력자원에 대한 정보 제공이 우선이다. 미국 Xcel 에너지사와 공동 연구를 수행중인 National Center for Atmospheric Research (NCAR) Research Applications Laboratory에 따르면 풍속 정확도가  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  향상 될 때 100MW 풍력단지에서 연간 250,000달러 가치의 전력 생산이 증가한다(NCAR, 2009). 풍력에너지의 추정방법은 발전예정지에서의 장기간 풍속 관측이 필요하다. 그러나 이 자료는 거의 존재하지 않으며 이에 대한 대처 방안으로 발전예정지의 근거리 지상 관측 자료를 이용하여 공간적으로 내삽, 연직 풍속은 외삽하는 방법이 있다. 이 방법은 지형과 지표 특성에 따라 변화 가능한 풍속의 공간적 변동성을 고려하지 못한다. 또한 풍력 발전을 위한 고도 80 m 정도의 바람정보는 관측되지 못하며 외삽에 의한 오차가 존재한다. 그러므로 우리나라와 같은 복잡한 지형에서는 큰 오차가 발생할 수 있는 방법이다.

수치모델에 의한 풍속 예측은 고해상도 지형과 지표 이용도를 고려하며 모델의 환경설정 에 따라 정밀한 하층 바람이 계산 가능하다. 최근 컴퓨팅 기술의 발전과 수치모델 물리과정의 개선으로 인하여 1990년대 이후 중규모 수치모델을 이용하여 미국, 덴마크, 노르웨이, 홍콩등에서 자원지도가 개발되고 있다. 미국의 풍속 자원지도는 TruWind 회사에서 중규모 모델 MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System) 와 연속방정식에 기반한 유동 모델 WindMap을 결합하여 개발되었다. 덴마크는 수치모델 KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model)과 선형이론 모델 WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program)를, 노르웨이에서는 계산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용하여 해안지역의 바람지도를 작성하였으며 (Yim *et al.*, 2007), 중규모 모델 WRF (Weather Research and Forecasting)를 이용하여 풍력 자원에 관한 활용성을 진단하였다 (Byrkjedal and

Berge, 2009).

홍콩의 풍력 자원지도 개발을 위하여 Yim *et al.* (2007)은 MM5 (Fifth Generation Mesoscale Model) 와 질량 보존 진단 모델인 CALMET을 이용하여 지형이 복잡한 홍콩의 고해상도 풍력자원지도를 개발하였다. NCAR에서 개발된 중규모 모델 MM5와 WRF는 공개된 모델로서 전 세계의 많은 사용자에게 의해 모델의 평가가 지속적으로 이루어지고 있다. 또한 최근에 개발된 WRF는 미규모 기상 현상까지 모의 가능하며, 물리과정 등이 기존 MM5 모델보다 개선되었다.

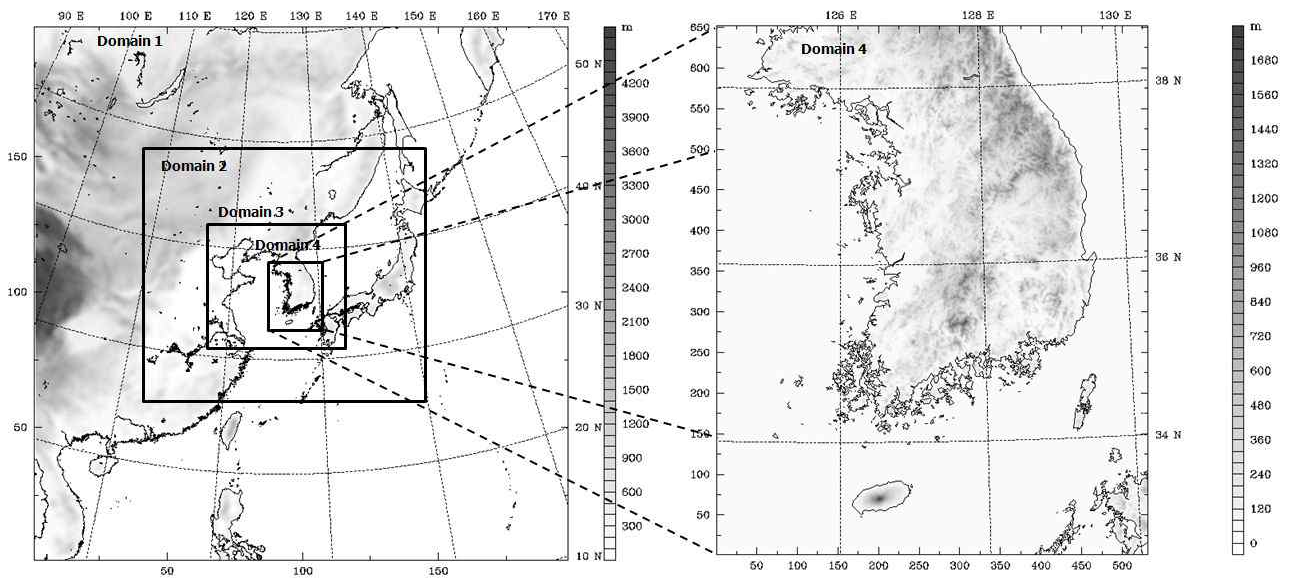
우리나라의 풍력자원지도는 한국에너지기술연구원에서 수치모델 MM5를 이용하여  $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$  격자 간격으로 작성되었다 (김현구 등, 2006). 또한 기상청에서는 관측자료에 기반하여 고도 50 m와 80 m의 풍속 정보를 제공한다 (기상청, 2007). 이들 자료의 공간 거리는 평균 10 km 정도로서 복잡한 우리나라의 지형에서는 국지 기상의 표현이 거의 불가능하다. 지형이 복잡한 지역의 풍속 예측을 위해서는 격자 간격 1 km 이하의 상세 수치 모델이 필요하며, 최근의 수치모델을 이용한 풍력 기상자원지도 개발은 1 km 내외의 격자 간격으로 수행되어 소개되고 있다.

본 연구에서는 우리나라의 풍력 발전 가능 지역에 관한 과학적이고 체계적인 정보를 제공하고자 수치 모델을 이용하여 상세한 한반도 풍력 기상자원지도를 작성하고 풍력 기상자원의 공간 분포를 분석하고자 한다. 2장에서는 풍력 자원 산출을 위한 수치모델과 모의 방법을 설명하고, 3 장에서는 우리나라의 풍력 자원 분포와 수치 모의된 풍력 자원 검증 결과를 제시한다. 4장에서는 결론을 맺는다.

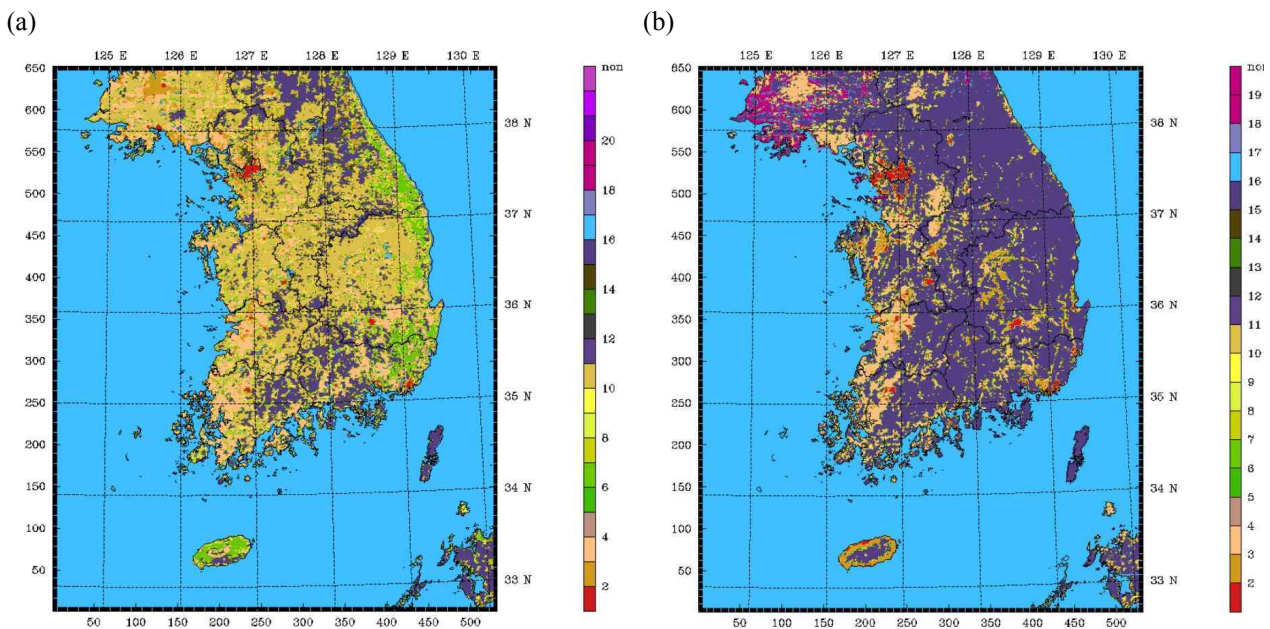
## 2. 수치모델 및 모의 방법

본 연구에서는 미국 NCAR에서 개발된 중규모 모델 WRF (Weather Research and Forecasting, Skamarock *et al.*, 2008)를 이용한다. WRF는 비정역학 모형으로 미규모, 중규모 기상 현상을 모의하기에 적합하며 1 km 해상도의 국지기상 현상을 성공적으로 모의하였다 (변재영 등, 2009).

고해상도의 수치모델은 지형 및 지표이용도 자료의 정확도에 따라 더 현실성이 있는 풍속을 예측할 수 있다. 수치모델 WRF는 기본적으로 지형 및 지표 이용도 자료로서 USGS (United States Geological Survey)



**Fig. 1.** Configuration of the two-way-nested domains of the WRF model. Grid sizes of the domains are 27, 9, 3, 1 km. Topography of the model domain is shaded. Terrain interval is 100 m over domain 1 (left) and 40 m over domain 4 (right).



**Fig. 2.** (a) Land use distribution over the 1 km grid size domain by the USGS land use map. (b) Same as (a), except for land use map obtained from Korea. Land use categories are described by USGS classification (Wang *et al.*, 2009).

자료를 이용한다. 이 USGS의 지형자료는 최대 30초의 해상도이나 복잡한 지형 구조를 갖는 우리나라에 대해서는 보다 세밀한 해상도의 지형자료가 필요하다. 또한 USGS의 지표이용도자료는 우리나라에 대해 대부분의 지역이 사바나 지역으로 잘못 표시되어 있기 때문에 이에 대한 개선이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 중규모 모형으로부터 한반도 지역에 적합한 상세한 모델 구축을 위하여 지형

자료와 지표이용도의 지면 경계 조건을 개선하였다. NCAR에서 제공하는 USGS (United States Geological Survey) 30초 지형 자료를 SRIM (Shuttle Radar Topography Mission) 3초 지형자료로 개선하였다. 또한 우리나라의 상세한 지표이용도를 모델에 입력하기 위하여 한국 수자원공사에서 생산된 30 m 해상도의 자료를 입력하여 하층 바람장을 개선하였다. 개선된 지형과 지표이용도의 분포를 Fig. 1과 Fig. 2에서 제시하였

**Table 1.** Typical meteorological year for wind map over the Korean Peninsula using WRF model.

Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Year	2008	2006	2004	2004	2005	2003	2005	2004	2006	2005	2005	2002

다. Fig. 2는 지표이용도의 개선 전과 후를 비교한다. 한반도 지표이용도의 개선 전 분포는 중부 지방의 산림 지역을 사바나 지역으로 표현하고 있다. 개선 후의 지표이용도는 산림지역으로 수정하고 있으며 대도시 주변의 최근 도시화 경향을 잘 반영하고 있다.

풍력자원지도는 순간의 바람이 아니라 수년 또는 수십 년간 바람의 통계적 특성이다. 그러므로 풍력자원지도를 개발하기 위해서는 특정 일 년에 대한 모의가 아니라 여러해에 대한 모의 및 분석이 필요하다. 그러나 수년간에 대한 수치 모의는 모의 시간 등의 문제를 고려하였을 때 비 경제적이다. 본 연구에서는 1998~2008년까지의 전국 기상대에서 관측된 바람 자료를 이용하여 통계적인 방법으로 11년의 매월 평균 상태와 가장 유사한 특정해의 월을 찾아 TMY (Typical Meteorological Year)를 구성하고 TMY 기간에 대하여 모의하였다 (김혜중 등, 2009). Table 1에서 본 연구의 모의된 TMY 기간을 제시하였다.

모델의 초기 자료는 NCEP (National Center for Environmental Prediction) FNL (Final) 자료를 이용하였으며, 27 km부터 1 km까지 4개의 영역에 대하여 2-way 네스팅 방법으로 수행하였다. 한반도 풍력 기상자원지도로써 활용되는 1 km 격자의 영역은 동서 방향으로 531 km, 남북 방향으로 651 km이다. 연직은 27개 층으로 모델 최상은 약 22 km 이며, 풍력 발전 터빈 고도에서의 풍속 예측 정확도 향상을 위하여 고도 80 m 근처에서 모델의 연직 층을 추가하였다. 경계층 물리과정 모수화는 YSU 방법 (Hong and Pan, 1996)을 이용하였다. 지면온도와 수분 모수화는 Noah LSM 방법 (Chen and Dudhia, 2001)이며, 아격자 규모 미세물리 모수화 방법은 WDM6 (Lim and Hong, 2009) 방법이며, 적운 모수화는 27 km, 9 km 격자영역에 대해서 New Kain-Fritsch (Kain, 2004) 방법을 이용하였다. 장파복사는 RRTMG 모수화 방법 (Mlawer *et al.*, 1997), 단파복사는 Goddard (Chou and Suarez, 1994) 방법을 이용하였다.

모델의 영역을 Fig. 1에 제시하였다. 한반도 풍력-기상자원지도는 남한과 제주도, 남서해안의 도서 지역을 포함한다. 울릉도와 독도는 계산 시간의 한계로 인하여 현재의 지도에서는 제외되었다.

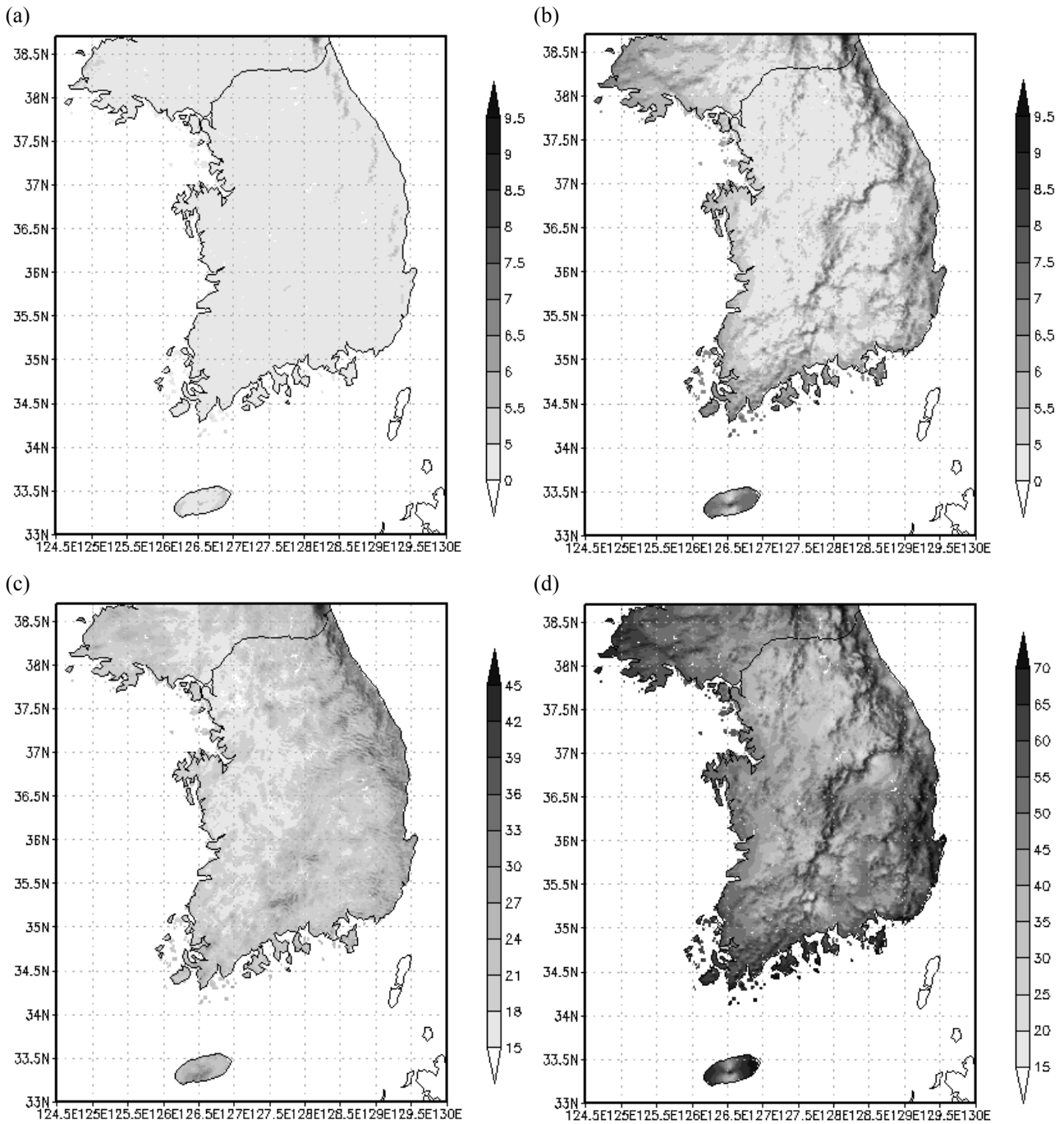
### 3. 모의 결과 및 검증

#### 3.1 풍력-기상자원지도 특성

풍력-기상자원지도는 지상으로부터 고도 10 m, 80 m에서 풍력발전이 가동 가능한  $5 \text{ m s}^{-1}$  이상의 연 평균 풍속을  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  간격으로 제시하였다 (Fig. 3 (a), (b)). 고도 10 m 풍속의 분포는 강원도 산악 지역과 제주도 해안을 제외한 전국 대부분의 지역에서  $5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 약한 풍속만을 보인다. 고도 80 m에서 풍속은 풍력 발전이 가능한 강풍 지역을 보다 뚜렷하게 나타낸다. 고도 80 m 연 평균 풍속으로부터 풍력 발전의 잠재 가능지역은 내륙의 산악지역, 해안, 제주도임을 알 수 있다. 특히 강원도 및 남·동해안에서 강한 풍속을 나타낸다. 최대 풍속은 강원도 산악지역 지역에서 나타난다.  $7.5 \text{ m s}^{-1}$  이상의 풍속은 강원도 태백산맥, 경남·북 동해안, 남해안, 제주도에서 나타난다. 반면 서해안과 내륙의 대부분 지역에서는 풍력 발전의 가치가 없는  $5.0 \text{ m s}^{-1}$  이하를 나타낸다. 연 최대 풍속의 분포를 Fig. 3 (c)에서 제시하였다. 최대 풍속은 강원도 산악 지역에서  $45 \text{ m s}^{-1}$  를 나타낸다. 강원도 동해안과 내륙의 지리산, 제주도에서 강한 풍속을 보인다. 서해안과 경기도, 충남, 전북 등의 서해안에서는  $18 \text{ m s}^{-1}$  이하의 풍속이 존재한다.

Fig. 3(d)는 풍력발전에 영향이 큰  $5.0 \text{ m s}^{-1}$  이상 풍속의 일년 동안 발생하는 비율이다. 평균 풍속이 강한 강원도와 내륙의 산악지역, 동·남해안, 제주도에서 65%이상의 높은 비율을 나타낸다. 우리나라의 동·남부 대부분의 지역에서 50%이상을 보이며, 서해안과 내륙에서는 40%이하를 나타낸다.

우리나라 풍력자원의 월별 분포를 조사하기 위하여 Fig. 4에서 지상으로부터 고도 80 m 풍속의 분포를 조사하였다. 한국의 풍력자원은 겨울 (12월, 1월, 2월)과 봄 (3월, 4월, 5월)에 최대이며 여름 (6월, 7월, 8월)과 가을 (9월, 10월, 11월)에 최소가 되는 계절적 변동성을 갖는다. 겨울의 평균 바람은 다른 계절에 비하여 가장 강하다. 강풍 ( $9 \text{ m s}^{-1}$  이상) 지역은 1월과 12월보다 2월에 증가한다. 12월의 강풍 면적은 제주도와 경남·북 동해안, 강원도 산악지역 (설악산, 오



**Fig. 3.** Annual average wind speeds over the Korean Peninsula at (a) 10m and (b) 80m above ground. Wind speed is shaded with interval of  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  for high wind speed above  $5 \text{ m s}^{-1}$ . (c) Annual distribution of maximum wind speed, and (d) ratio of wind speed which is larger than  $5 \text{ m s}^{-1}$  at 80 m above ground.

대산, 태백산)에서 증가한다. 1월에는  $9 \text{ m s}^{-1}$  이상의 바람이 울산, 포항, 울진 근처의 동해안과 제주도, 목포 근처의 남서해안에서 나타난다. 2월의  $9 \text{ m s}^{-1}$  이상 바람은 강원도 산악지역에서 강화된다. 강원도 산악지역에서  $9 \text{ m s}^{-1}$  이상의 바람이 넓게 분포하며 경남·북 동해안과 전남 남서해안과 제주도에서도 강풍

이 존재함을 볼 수 있다. 서해안과 내륙에서는 대체로 약한 풍속이 존재하며 내륙의 산능선에서는 강풍이 발생하고 있음을 보인다.

봄의 강풍 지역은 겨울보다는 다소 감소하나 다른 계절에 비하여 여전히 강풍 지역이 넓게 분포한다. 3월의  $5 \text{ m s}^{-1}$  이상의 강풍 지역은 겨울과 유사하나, 9

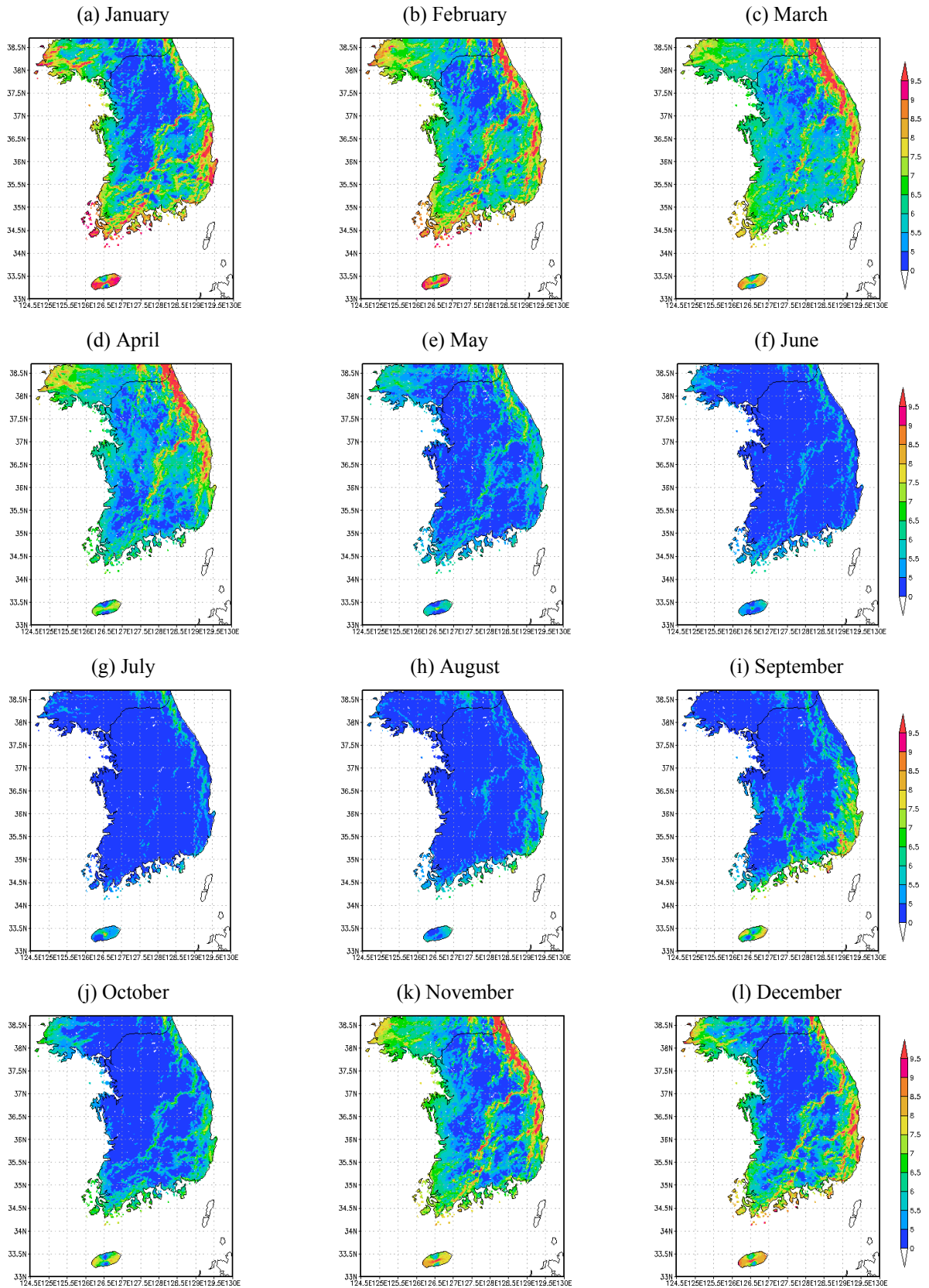


Fig. 4. Spatial distribution of monthly mean wind speeds at 80 m above ground. Wind speed is shaded with interval of 0.5  $m s^{-1}$  for high wind speed above 5  $m s^{-1}$ .

$\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍 지역은 강원도 산악지역과 제주도에서 존재한다. 강풍 지역은 4월과 5월에는 점차 감소함을 보인다. 4월의  $9\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍 지역은 강원도 산악과 경북 동해안에서만 나타난다. 5월에는  $9\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍 지역은 나타나지 않으며  $5\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍 지역도 내륙의 산악, 동해안, 전남 남해안과 제주도 지역에서만 존재함을 보이고 내륙의 대부분 지역에서  $5\text{ms}^{-1}$  이하의 약한 풍속을 보인다.

여름은 풍속이 크게 감소함을 보인다. 전국 대부분 지역에서  $5\text{ms}^{-1}$  이하의 풍속을 나타낸다.  $5\text{ms}^{-1}$  이상의 풍속은 산악 지역과 해안, 제주도에 나타난다. 6월은 강원도 산악지역, 내륙의 산악지역(속리산, 덕유산, 지리산), 전남 남해안에서 강풍이 존재한다. 7월의 풍속은 일 년중 가장 약한 분포를 나타냈으며, 강원도 동해안 산악지역(설악산, 오대산, 태백산)에서만  $5\text{ms}^{-1}$ 의 풍속을 보이고 남부지방 내륙의 산악지역과 해안에서는 풍속이 약화되었다. 8월의 강풍( $5\text{ms}^{-1}$ ) 지역은 부산을 포함한 경남과 울산, 포항 근처의 해안에서 나타난다. 전남과 경남의 남해안과 제주도에에서도  $6\text{ms}^{-1}$  이상의 풍속지역이 존재함을 보인다.

가을의 바람은 9월과 10월은 약한 풍속을 보이나 11월은 가장 강한 풍속을 보인다. 가을 평균 풍속은 봄과 겨울보다는 약하지만 여름보다는 증가한다.  $5\text{ms}^{-1}$  이상의 풍속은 강원도 산악지역, 경남·북 동해안, 남해안, 제주도에 나타난다. 9월의 강풍은 주로 경남·북 동해안에서 볼 수 있다. 10월에는 강원도 산악지역으로  $6\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍이 확대되며, 11월은 강원도 산악지역과 경북 동해안, 내륙 산악지역(속리산, 덕유산, 지리산)에서  $9\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍이 존재한다. 11월은 제주도와 전남 남·서해안에서도  $7\text{ms}^{-1}$  이상의 강풍이 존재함을 보인다.

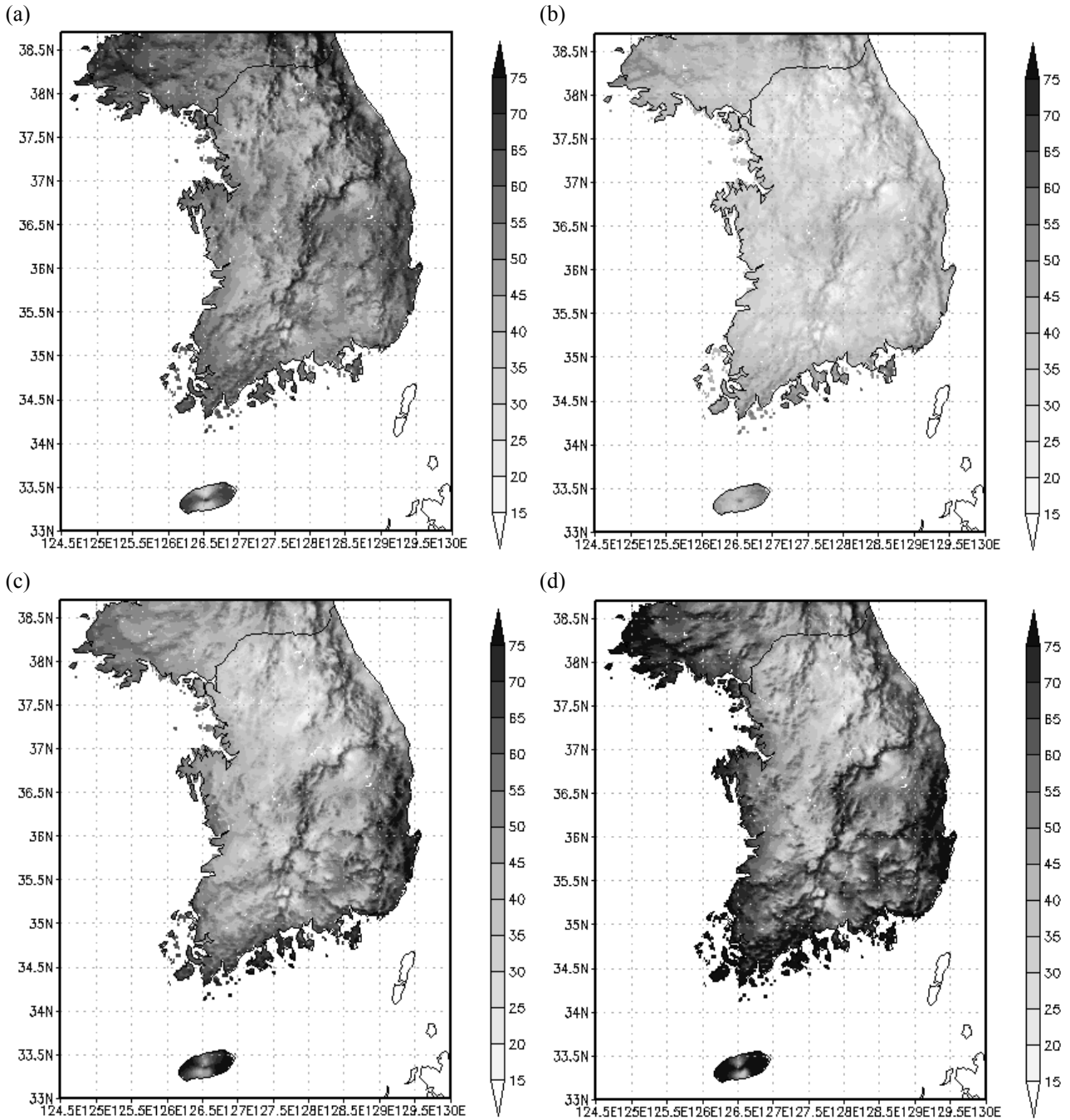
풍속은 계절 별 변화의 분포를 잘 나타냈다. 여름에는 풍속이 가장 약하고 겨울과 봄에 강한 풍속을 보인다. 겨울과 봄의 강한 풍속은 강원도 동해안과 제주도에 나타나고 내륙에서는 속리산, 지리산 근처의 산악지역에서 나타난다. 여름은 강원 동해안에서 풍속이 강하며 최대 풍속은 부산 근처의 경남 동해안에서 나타났다.

풍력 발전의 효율적인 운영을 위해서  $5\text{ms}^{-1}$  이상의 풍속이 발생하는 비율을 계절별로 조사하였다(Fig. 5). 풍력 발전은 약한 바람보다는 강한 바람이 지속적으로 유지될 때 발전이 효과적이므로 강풍 발

생 비율이 높은 지역이 풍력 발전 가능 지역이 될 수 있다.  $5\text{ms}^{-1}$ 의 풍속은 강풍 발생 지역과 일치하여 대부분의 계절에서 동해안, 남해안, 제주도의 해안지역과 내륙은 산악지역에서 최대값을 보였다. 봄에는 강원도와 경북 동해안, 남서해안, 제주도에 높은 풍속 발생 비율을 나타냈다. 여름은 동해안과 남해안, 제주도에 50% 이상의 발생 비율을 보이고, 가을은 경남·북 동해안, 남해안과 제주도에 70% 이상을 나타낸다. 겨울은 전국 대부분 해안과 남부 내륙지역까지 70% 이상의 비율을 나타낸다. 특히 겨울은 동해안, 남해안, 제주도에 강한 풍속 발생 비율을 보인다.

지역별로 풍속의 기후학적인 범위 조사를 위해 Fig. 6에서는 계절에 따른 풍속의 최대값을 조사하였다. 풍속의 최대는 겨울에 나타나며, 여름의 풍속 최대는  $36\text{ms}^{-1}$ 로 다른 계절보다 작은 값을 보였다. 봄은 강원 동해안 지역에서 최대 풍속 지역이 나타났으며, 여름은 동해안과 강원 내륙, 제주도에 강한 풍속지역이 존재하였다. 가을의 최대 풍속은 경북 동해안에서 나타나며, 남해안과 내륙의 산악지역, 제주도에에서도 풍속은 강화된다. 동해안의 최대 풍속 지역은 계절에 따라 위도대가 남하하였다. 즉, 봄과 겨울은 가장 고위도대( $38^{\circ}\text{N}$ )에서 여름과 가을은  $37^{\circ}\text{N}$ ,  $36.5^{\circ}\text{N}$ 로써 봄과 겨울보다 저위도에서 풍속이 증가하였다. 겨울은 강원 동해안, 남서해안, 제주도에 최대 풍속 지역이 존재하였다. 최대 풍속은 풍력발전기 설계 시 참고할 수 있는 발전기가 견디어야 할 바람의 크기를 제시한다(기상청, 2007).

풍력 발전은 풍속이 강하며, 풍향이 일정한 지역에서 발전의 효율성이 증가한다. 즉, 주풍향이 일정하지 않고 풍향이 자주 바뀌는 지역은 효율성이 작아진다. 강풍이 발생하고 주풍향 발생 비율이 높은 지역이 풍력 발전에서 가장 유리한 지역이 될 수 있다. 그러므로 Fig. 7에서는  $5\text{ms}^{-1}$  이상의 풍속에 대하여 주 풍향 발생 비율을 조사하였다. 우리나라의 주 풍향은 대부분의 계절과 지역에서 서풍이 우세하였다(제시하지 않음). 여름은 남서풍이 우세하고, 봄, 가을과 겨울은 북서풍이 우세하였다. 그러나 강원도 산악지역에서는 봄과 겨울에도 남서풍이 존재하여, 복잡한 산악 지형에서 수치모델의 오차가 컸다. 주 풍향 발생 비율의 분포에서도 최대 비율은 강풍 발생 지역과 일치하여 강원 동해안, 내륙 산악지역에서 최대를 보였다. 그러나 계절에 따라 최대 비율 지역이 봄과 여



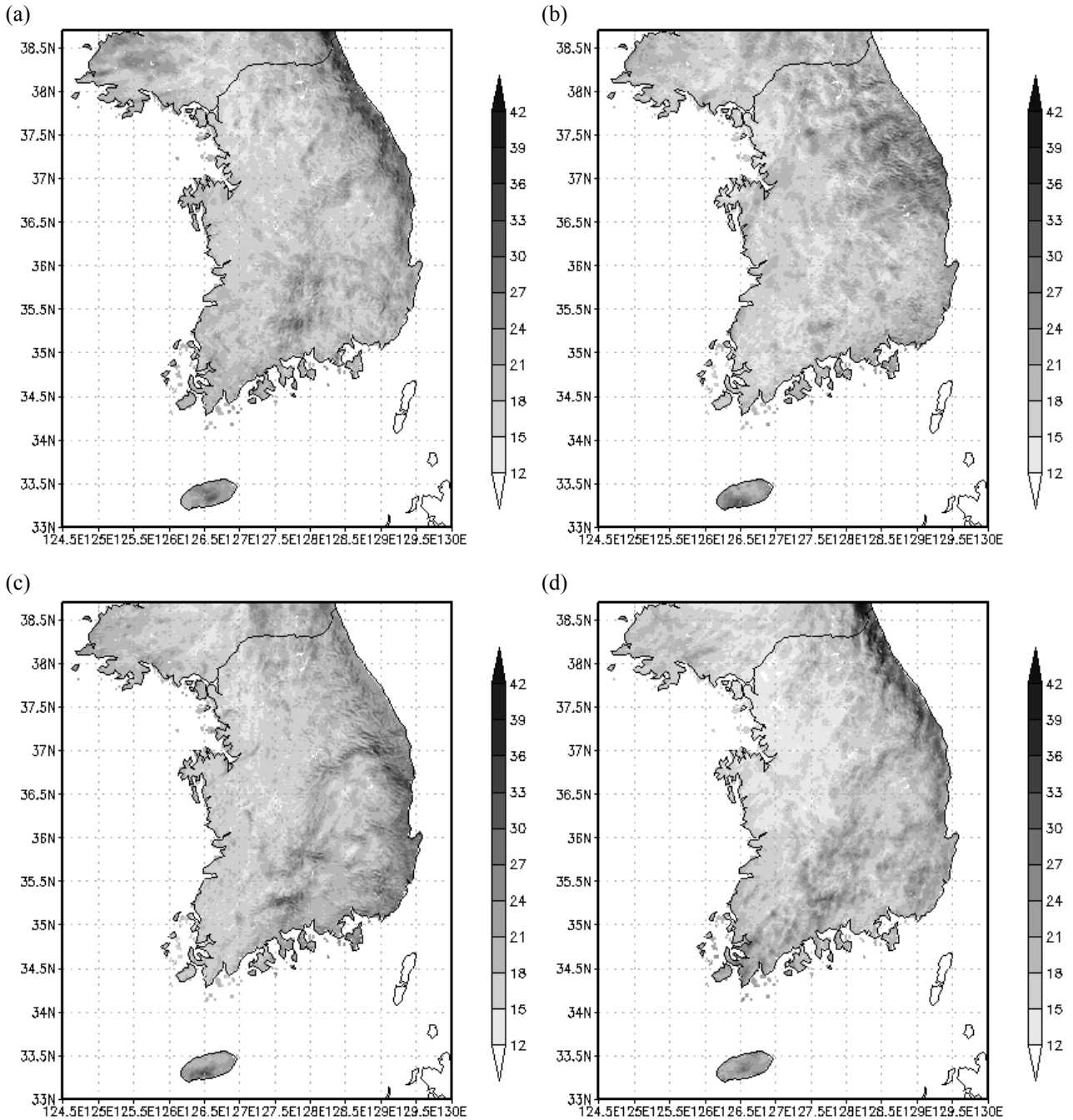
**Fig. 5.** Seasonal distribution of percentage of wind speed which is larger than  $5 \text{ m s}^{-1}$  at 80 m above ground. (a) Spring (March-May), (b) Summer (June-August), (c) Autumn (September-November), and (d) Winter (December-February).

름은 강원도에서 50%, 가을과 겨울은 남해안과 동해안에서 50-60%정도 나타나는 차이가 있었다.

풍속이 강해지고 약화되는 시간 별 특성은 전력 생산과 저장 및 풍력 발전 활용에서 중요한 정보가 될 수 있으므로 한반도 풍속의 일 변화를 Fig. 8에서 제시하였다. 새벽 시간 (03-06 LST)의 풍속은 경북 동해안과 제주도에 증가하며, 내륙에서는 감소한

다. 가장 강한 풍속은 강원도 산악 지역과 경북 영덕 근처에서 나타난다. 오전 시간 (09 LST)의 풍속 분포는 해안 지역과 내륙 산악 지역에서 새벽 시간 (03-06 LST)보다 약화됨을 보이며, 특히 내륙의  $5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 약한 풍속 지역이 확장되고 있다. 12 LST에는 풍속이 가장 약한 상태를 보인다. 오후 시간 (15-18 LST)에는 내륙의 풍속이 점차 증가하고 있





**Fig. 6.** Seasonal distribution of maximum wind speeds at 80 m above ground. (a) Spring (March-May), (b) Summer (June-August), (c) Autumn (September-November), and (d) Winter (December-February).

으며, 특히 남·서해안의 풍속이  $7 \text{ m s}^{-1}$  이상으로 강화된다. 야간 시간(21 LST)은 남서해안과 내륙의 강한 풍속이 지속되며, 오후 시간동안 약화된 강원 산악 지역의 풍속은 점차 증가함을 보인다. 풍속의 일 변화는 내륙에서는 오후와 야간 시간에 증가하며, 해안과 산악 지역에서는 새벽 시간에 증가함을 보인다. 그러나 계절에 따라 지역별로 강풍이 나타나는 시각

은 변화한다(제시하지 않음). 여름은 새벽(03 LST)에 남해안의 풍속이 증가하고, 오후(15 LST)에는 동해안의 풍속이 증가한다. 반면, 겨울은 새벽(03 LST)에 동해안의 풍속이 증가하고 15 LST에는 남·서해안의 풍속이 증가함을 나타낸다. 지역에 따른 풍속의 일 변화의 차이는 풍력 발전의 효율적인 운영 정보 제공에 기여할 수 있다.

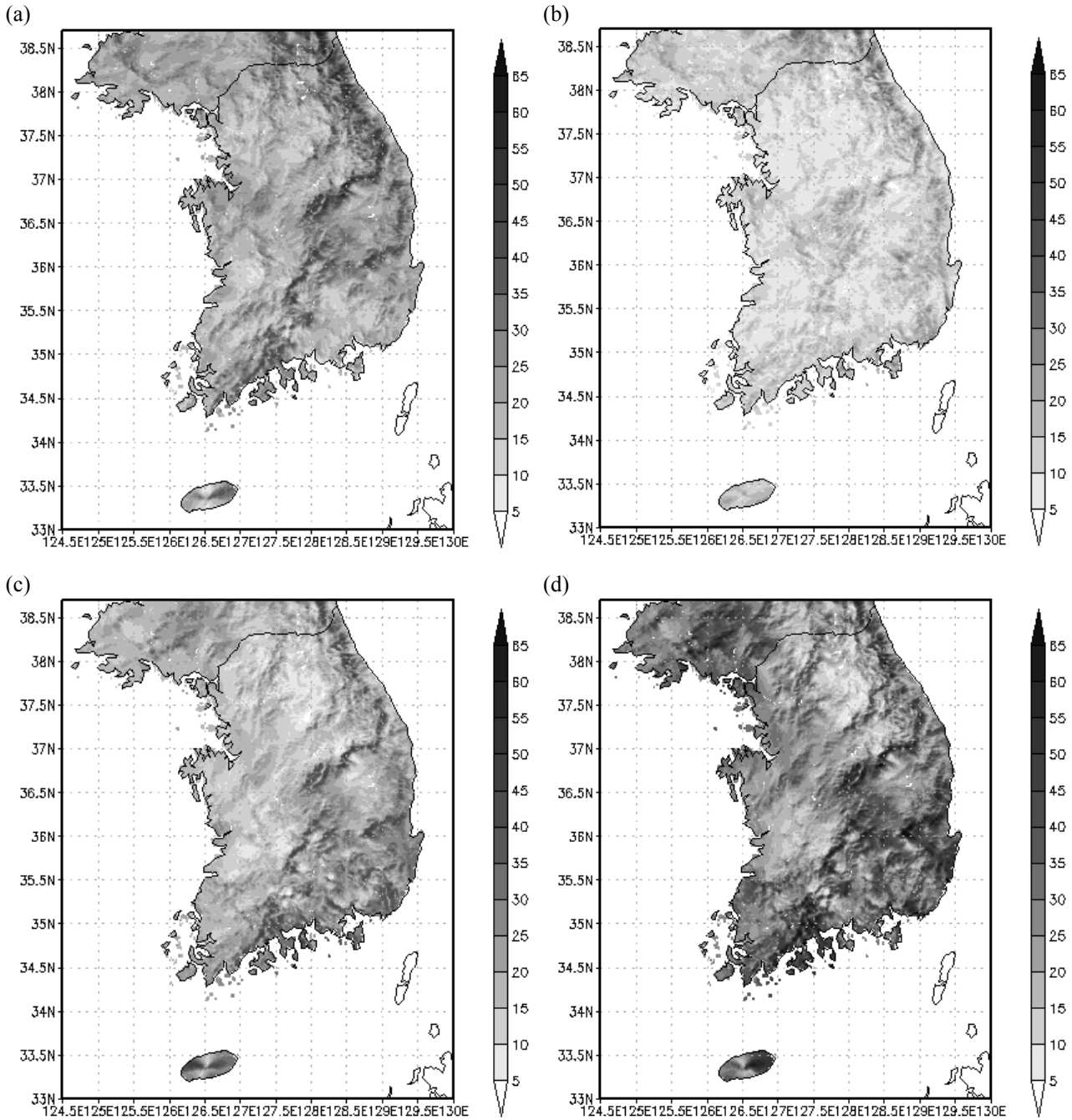


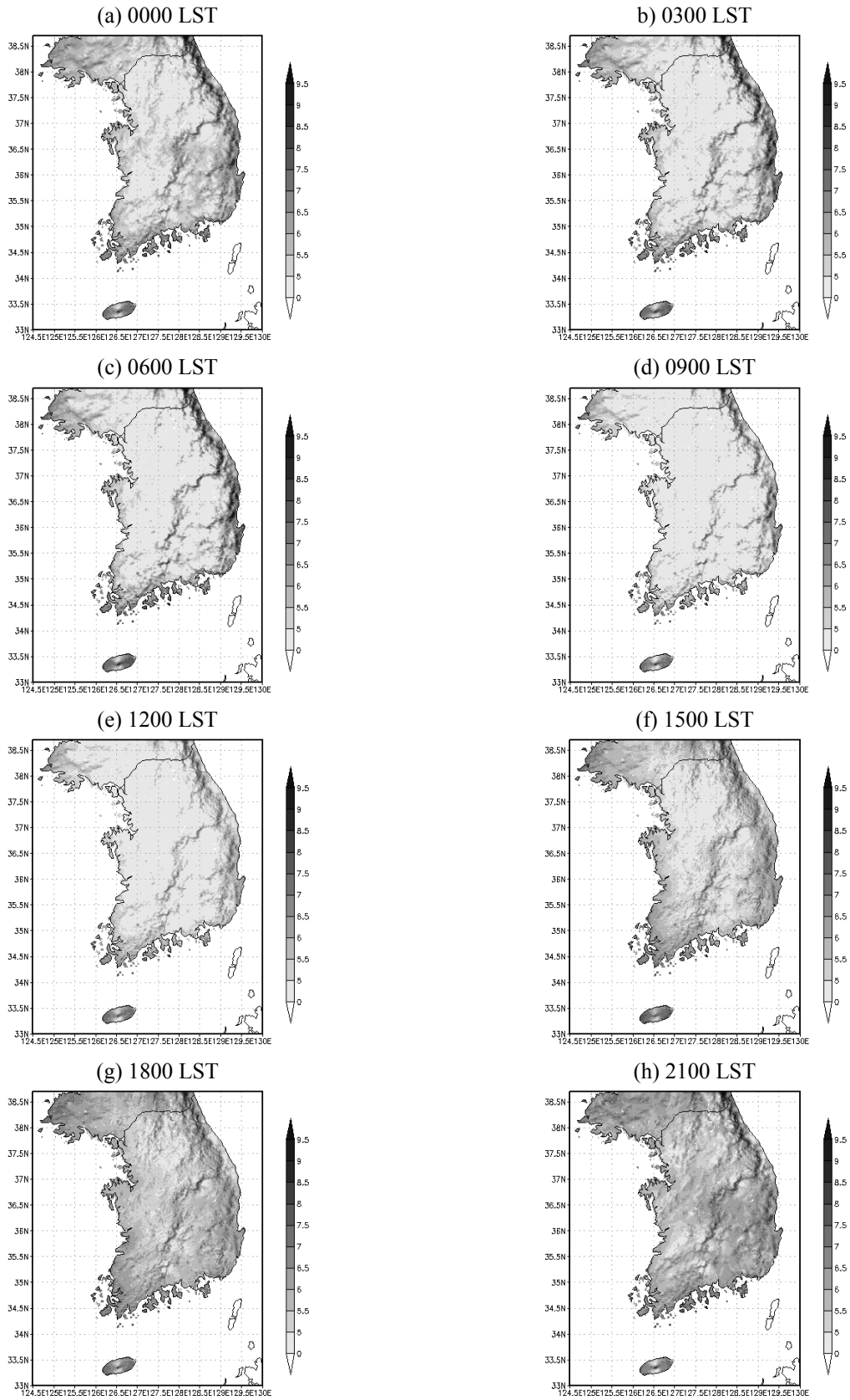
Fig. 7. Same as Fig. 5, except for percentage of main wind direction which is larger than  $5 \text{ m s}^{-1}$  at 80 m above ground .

### 3.2 검증

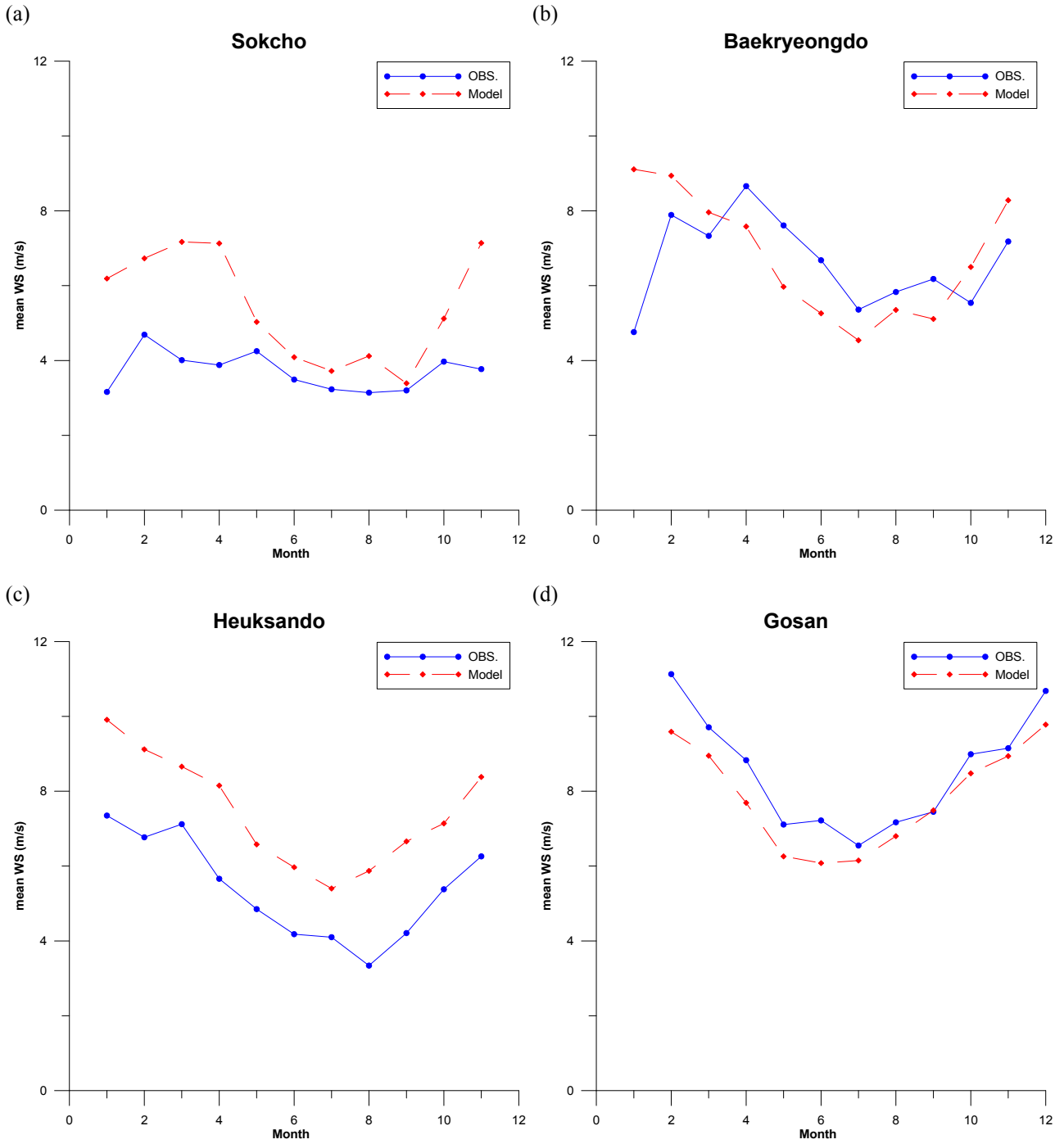
고층 기상 관측 자료의 고도 80 m 풍향, 풍속 자료를 이용하여 모의된 고도 80 m 풍력-기상자원지도의 풍향, 풍속의 월 평균과 Bias, RMSE의 통계적 검증을 실시하고, 풍향에 대해서는 절대오차 (MAE)를 조사하였다. 고층 기상관측 자료는 속초, 백령도, 흑산도, 고산의 4개의 기상대에서 관측된 자료이다.

고도 80 m의 바람 자료 검증을 위해서는 지표층 근처의 관측이 포함된 라디오존데의 원시 자료를 이용한다. 라디오존데 원시 자료는 고층 기상관측소에 따라 보관 기간의 차이가 있으므로 속초, 백령도, 흑산도에서는 1월부터 11월까지 기간을 이용하였으며, 고산은 2월부터 12월까지 기간에 대하여 검증하였다.

Fig. 9는 고도 80 m에서 관측된 풍속과 모의된 풍속의 월 평균 분포이다. 속초의 관측된 월 평균 풍속



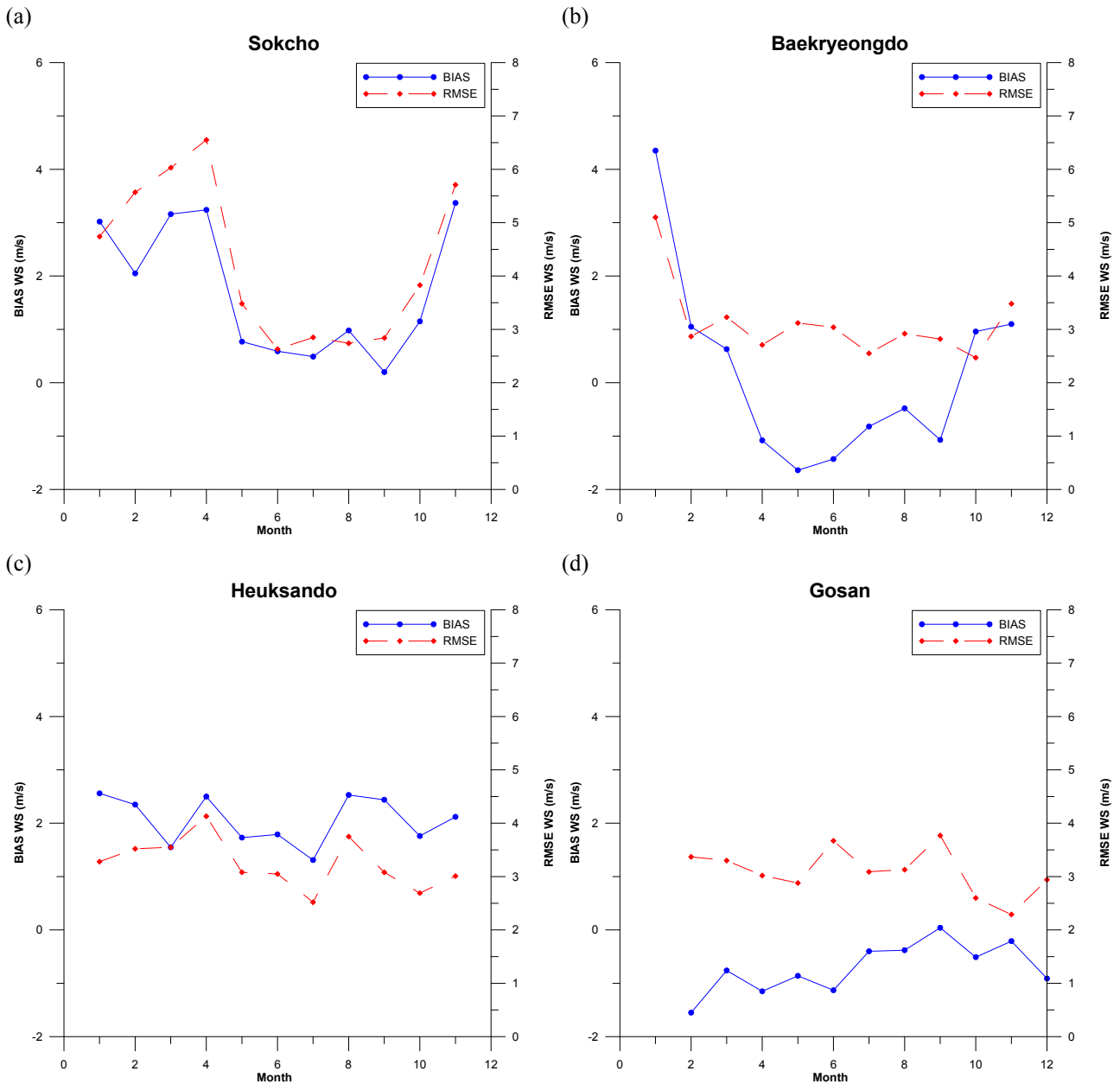
**Fig. 8.** Diurnal distribution of wind speed at 80 m above ground. Wind speed is shaded with interval of  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  for high wind speed above  $5 \text{ m s}^{-1}$ .



**Fig. 9.** Comparison of monthly mean wind speeds at 80 m above ground from the model and upper air observation at (a) Sokcho, (b) Baekryeongdo, (c) Heuksando, and (d) Gosan. Solid line and dashed line indicate the observation and simulated wind speed, respectively..

은 2월, 5월, 10월이 다른 기간보다 풍속이 증가하고 1월과 여름에 약화된다. 평균적으로  $4 \text{ m s}^{-1}$  정도의 풍속을 나타낸다. 그러나 모의된 풍속은 1-4월까지 6  $\text{m s}^{-1}$  이상을 나타내어 모의된 풍속이 관측보다 크다. 5월-9월까지는 관측과 모의된 풍속은 거의 유

사하나 10월과 11월에서 다시 오차는 증가한다. 백령도에서의 관측된 풍속의 분포는 1월에 최소를 보이고 2-6월은 7-8  $\text{m s}^{-1}$ 의 강풍을 나타낸다. 7-10월까지는 풍속이 약화되었으며 11월에 증가하는 경향을 보인다. 모의된 풍속의 분포는 1월에 9  $\text{m s}^{-1}$  정도

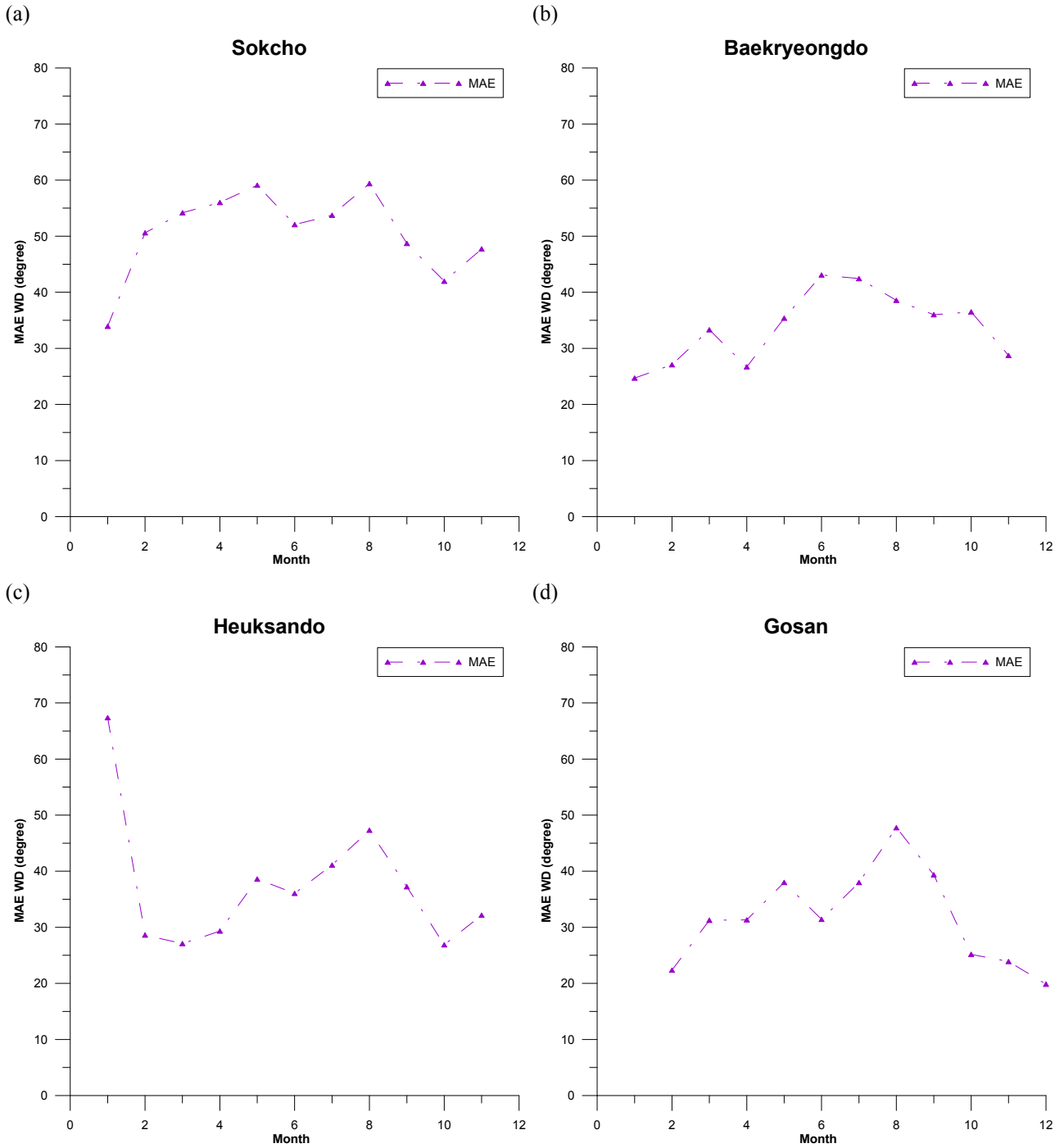


**Fig. 10.** Distribution of monthly bias and RMSE of wind speeds at 80 m above ground between the model and upper air observation at (a) Sokcho, (b) Baekryeongdo, (c) Heuksando, and (d) Gosan. Solid line and dashed line indicate the bias and RMSE, respectively.

의 크기를 나타내어 관측과의 오차가 크다. 그러나 봄, 겨울의 강풍, 여름과 겨울의 약한 풍속이 나타나는 경향은 모의된 결과와 관측이 잘 일치하고 있다. 흑산도의 풍속 분포는 여름에 최소이고 봄과 겨울의 강풍 존재는 백령도와 일치하고 있다. 모델은 관측보다 과대 모의 되고 있으며, 모든 시기에 대하여  $2 \text{ m s}^{-1}$  정도 과대 모의하고 있다. 여름 풍속이 최소가 되는 경향은 고산 관측소에서도 나타났으며, 고산은 모델에서 관측보다 과소 모의되는 경향이 있다. 그러나

오차의 차이는 속초, 백령도, 흑산도보다 작으며, 봄과 여름에 오차는 증가하고 가을, 겨울의 오차가 감소하였다. 대체로 계절적인 풍속의 오차는 겨울에 증가하며, 지역적으로는 속초에서 최대를 보인다.

풍속의 통계적인 검증 스코어인 Bias의 분포는 속초와 흑산도에서는 과대 예보를 백령도와 고산에서는 과소 예보를 나타낸다 (Fig. 10). 속초의 봄, 가을, 겨울 Bias는  $2\text{-}3 \text{ m s}^{-1}$  오차를 나타내 여름의 Bias  $0.1 \text{ m s}^{-1}$  보다 증가한다. 백령도에서는 1-3월, 10-11월은



**Fig. 11.** Monthly variation of mean absolute error (MAE) of wind direction at 80 m above ground between the model and upper air observation at (a) Sokcho, (b) Baekryeongdo, (c) Heuksando, and (d) Gosan.

1 m s<sup>-1</sup> 에서부터 최대 4 m s<sup>-1</sup> 까지 과대 모의를 보이거나 4-9월까지는 -1 m s<sup>-1</sup> 에서부터 -2 m s<sup>-1</sup> 의 과소 모의를 나타낸다. 흑산도는 기간에 따른 오차의 차이는 크지 않고, 2-3 m s<sup>-1</sup> 내외의 과대 오차를 보였다. 고산은 모든 기간에서 0~2 m s<sup>-1</sup> 과소 모의되고 있음을 보인다. 고산의 오차는 시기적으로 9월에 최소이

고 2월에 최대임을 나타냈다. 풍속의 RMSE 분포는 속초에서 3-6 m s<sup>-1</sup>, 백령도는 3-5 m s<sup>-1</sup>, 흑산도, 고산은 3-4 m s<sup>-1</sup> 를 보인다. 속초와 백령도에서는 봄과 겨울에 오차가 증가하였으며, 속초에서 오차는 여름에 최소를 보인다. 백령도에서 오차가 최소가 되는 기간은 뚜렷하지 않다. 흑산도와 고산에서도 기간에 따른

오차의 차이는 크지 않으나, 흑산도에서는 7월과 고산에서는 11월에 오차가 최소임을 보인다.

풍향의 오차를 나타내는 MAE는 지역과 시기에 따른 차이는 있으나 평균적으로 30-50도 정도의 오차를 보인다 (Fig. 11). 속초의 MAE는 30-60도이며 겨울 보다는 봄, 여름에 오차가 증가하였고, 백령도에서는 25-40도이며 여름에 오차가 최대였다. 흑산도의 오차는 1월에 70도를 나타내어 최대를 보였으며, 다른 기간에는 30-40도 정도의 오차를 나타낸다. 고산의 오차는 20-40도의 크기를 보이며 여름에 최대를 보인다.

Fig. 9와 Fig. 10의 풍속 오차 검증 결과로부터 풍속의 오차는 겨울에 증가하고 여름에는 감소함을 보였으나 풍향은 겨울에 오차가 감소하고 여름에 증가하였다. 또한 풍속은 속초와 백령도에서 겨울에 오차가 증가하는 경향을 보이는데 이들 지역의 국지적인 기상현상을 잘 모의하지 못하는 것으로 보인다. 풍향의 오차가 속초에서 가장 컸는데, 주풍향 공간 분포에서도 강원도 산악 지역에서 남서풍이 나타난 결과가 풍향의 정량적인 오차 결과와 일치하고 있다. 이러한 원인은 복잡한 산악 지역에서는 1 km 해상도가 충분히 기상 현상을 분해하지 못한 것으로 생각된다. 강원도 산악 지역의 풍향, 풍속의 정확도 향상을 위해서는 보다 고분해능이 필요하다.

#### 4. 결 론

풍력-기상자원지도는 풍력발전에 유용한 고도 80 m의 바람 정보를 이용하여 작성되나 이 고도의 바람은 거의 관측되지 않는다. 그러므로 관측되지 않는 80 m 고도의 풍속 정보는 지상 10 m 관측 자료로부터 연직 외삽을 하며, 공간적으로는 내삽을 한다. 그러나 지형이 복잡한 우리나라와 같은 지역에서는 바람의 공간적 변동성이 크므로 3차원 대기 수치모형이 바람 정보를 제공하는데 유용하다.

그러므로 본 연구에서는 미국 NCAR에서 개발된 중규모 수치모델 WRF을 이용하여 한반도의 풍력-기상자원지도를 작성하였다. 풍력-기상자원지도는 풍력 발전단지 조성을 위해서 효율적인 풍력 정보를 제공할 수 있는 1 km 해상도로 개발되었다. 한반도의 1 km 해상도 수치 모델 실행을 위해서 100 m 해상도의 지형 자료와 30 m 해상도의 지표이용도 자료를 이용하여 모델의 지면 경계조건을 개선하였다.

풍력-기상자원지도는 수년 또는 수십 년간의 통계적인 상태를 의미하므로 1998~2008년까지의 평균적인 상태에 대하여 수치 모의하여 자원지도를 개발하였다. 수치 모의된 결과는 매 시간의 풍향과 풍속, 풍력 발전에 필요한 유효한 풍속의 누적 시간과 각 지점의 주 풍향, 주 풍향 발생 비율 등의 정보를 제공할 수 있다.

우리나라 풍속의 평균 분포는 동해안, 남해안, 제주도에서 강풍이 발생하며 주 풍향은 대체로 북서풍이며, 주 풍향의 발생 비율은 산악 지역과 남·동해안에서 높아 풍력 발전의 최적지 정보를 제공한다. 우리나라의 풍속은 봄과 겨울에 최대이며, 여름에 최소를 나타냈다. 풍속의 일 변화는 새벽과 오전에는 동해안과 산악 지역에서 증가하며, 오후와 야간에는 내륙에서 풍속이 증가하는 특징을 보였다.

본 연구로부터 개발된 풍력-기상자원지도는 속초, 백령도, 흑산도, 고산에서 관측된 라디오존데 자료와 검증하였다. 풍속 검증은 RMSE 3-6 m s<sup>-1</sup>, 풍향의 오차인 MAE는 30-50도의 크기를 보였다. 향후의 자원지도는 자료동화를 통한 초기 자료, 모델의 물리과정 등이 지속적으로 개선 될 것이다.

1 km 해상도는 중규모 이하의 기상현상을 포함하는 초고해상도이다. 그러나, 지표 특성이 복잡한 지역에서는 1 km 간격에서 지형이나 지표이용도의 변화가 클 수 있다. 즉, 여러 형태의 지표이용도가 1 km 격자간격의 모델에서는 한 개의 지표이용도로 표현될 수 있다. 이러한 복잡한 지형과 지표이용도에 따른 바람 분포를 개선하기 위하여 지역에 따라서는 수백 m 또는 수십 m의 상세한 격자간격으로 자원지도의 개발이 필요하다.

#### 감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 “신생활 산업기상 기술개발”연구와 “녹색성장 지원기술개발”연구의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

기상청, 2007: 풍력기상자원지도 개발 연구보고서, *기상청 자료관리서비스팀 기술노트 2007-9*, 99 pp.  
 김성은, 정민희, 박진철, 이연구, 2008: 도시 재생을 위한 신재생에너지 적용에 관한 기초연구, *한국태양에너지 추계학술발표대회*, 120-125.

- 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 최현정, 김동혁, 2006: 수치 바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축. *한국태양에너지학회 논문집*, **26**, 31-38.
- 김혜중, 정선, 정영립, 최영진, 김규량, 2009: 한반도 바람자원의 TMY (Typical Meteorological Year) 구축에 관한 연구. *한국기후변화학회 2009년 학술발표회*, 136-138.
- 변재영, 최영진, 서범근, 2009: 중규모 수치모델을 이용한 호수 주변의 국지순환 모의. *한국지구과학회지*, **30**, 464-477.
- Byrkjedal, O., and E. Berge, 2009: The use of WRF for wind resource mapping in Norway. Preprints, *9<sup>th</sup> WRF user's workshop*, Boulder, CO., NCAR, P9.18.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Chou, M.-D., and M. J. Suarez, 1994: An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Memo. 104604, 3, 85 pp.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322-2339.
- IPCC, 2007: Climate change: The physical science basis-Summary for policymakers, *IPCC WGI Fourth Assessment Report*, 18 pp.
- Lim, K.-S., and S.-Y. Hong, 2009: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. Submitted to *Mon. Wea. Rev.*
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-K model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102(D14)**, 16663-16682.
- NCAR, 2009: 2009 RAL Annual Report. [Available online at <http://www.nar.ucar.edu/2009/RAL>.]
- Skamarock, W.C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125 pp.
- Wang, W., C. Bruyere, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H.-C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, and X. Zhang, 2009: ARW version 3 modeling system user's guide. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 264 pp.
- Yim, S. H. L., J. C. H. Fung, A. K. H. Lau, and S. C. Kot, 2007: Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system, *J. Geophys. Res.*, **112(D5)**, 5106-5121.