

한반도 풍력 자원 지도의 공간 해상도가 풍력자원 예측 정확도에 미치는 영향에 관한 수치연구

이순환 · 이화운* · 김동혁* · 김민정* · 김현구**

부산대학교 BK21 연안환경시스템사업단, *부산대학교 지구환경시스템학부, **한국에너지기술연구원
(2009년 5월 20일 접수; 2009년 6월 17일 수정; 2009년 7월 21일 채택)

Numerical Study on the Impact of the Spatial Resolution of Wind Map in the Korean Peninsula on the Accuracy of Wind Energy Resources Estimation

Soon-Hwan Lee, Hwa-Woon Lee*, Dong-Hyuk Kim*,
Min-Jung Kim* and Hyun-Goo Kim**

BK21 CESS, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Division of Earth Environment System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

***Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea*

(Manuscript received 20 May, 2009; revised 17 June, 2009; accepted 21 July, 2009)

Abstract

In order to make sure the impact of spatial resolution of wind energy map on the estimation of wind power density in the Korean Peninsula, the comparison studies on the characteristics of wind energy map with three different spatial resolutions were carried out. Numerical model used in the establishment of wind map is MM5 (5th generation Mesoscale Model) with RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) as initial and boundary data. Analyzed Period are four months (March, August, October, and December), which are representative of four seasons. Since high spatial resolution of wind map make the undulation of topography be clear, wind pattern in high resolution wind map is correspond well with topography pattern and maximum value of wind speed is also increase. Indication of island and mountains in wind energy map depends on the its spatial resolution, so wind patterns in Heuksan island and Jiri mountains are clearly different in high and low resolutions. And area averaged power density can be changed by estimation method of wind speed for unit area in the numerical model and-by-treatment of air density. Therefore the studiable resolution for the topography should be evaluated and set before the estimation of wind resources in the Korean Peninsula.

Key Words : Wind power density, Spatial resolution, Wind map, Korean Peninsula, Numerical model

1. 서론

인구 증가와 그에 따른 화석연료의 소비는 에너
지 자원의 부족과 대기오염에 따른 지구온난화를

유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 세계 각국은 청정에너지 확보에 주력하고 있다. 신재생에너지는 대기오염과 지구온난화를 방지할 수 있는 청정에너지로 연구가 진행된다. 풍력에너지는 신재생에너지 가운데 기술 성장속도가 빠르고 발전단가가 낮기 때문에 많은 나라에서 풍력단지개발을 통한 에너지 확보에 나서고 있다. 2004년 전 세계의 총 풍력발전량은 7976 MW로 해마다 20%씩 성장하고 있다. 그리고 2010년에는 최대 4 GW의 풍력에너지 확보될 것이라는 전망도 내놓았다. 그리고 한국 역시 2020년 전체 발전량의 9.4%를 풍력발전으로 확보한다는 목표를 설정하였다¹⁻³⁾.

이처럼 급격히 성장하는 풍력에너지 확보에 중요한 요인 중의 하나가 풍력자원의 정확한 평가이다. 실제 풍력단지 선정은 발전기 건설 지역의 장기적인 기상 모니터링이 필수적이다. 그러나 직접적이고 장기적인 모니터링 자료를 확보하는 것은 매우 어렵기 때문에 일반적으로 발전단지 주변의 정규 기상모니터링 사이트의 자료를 이용하여 풍력자원을 평가한다. 그러나 기상 관측사이트의 수가 적고, 공간 분포 역시 불규칙적이기 때문에 풍력자원 평가 정확도가 떨어진다. 이를 보완하기 위하여 3차원 수치모형에 의해서 공간적으로 균질한 풍력자원 평가를 시행하고 있다⁴⁻⁶⁾. 그리고 이를 바탕으로 풍력자원지도를 생산하고 있다. 뉴욕주 에너지연구개발부(New York State Energy Research and Development)는 중규모 대기역학 모형을 이용하여 뉴욕주 풍력자원 지도인 MesoMap을 완성하였다⁷⁾. 우리나라의 경우 에너지기술연구원에서는 MM5(5th generation of Mesoscale Model)를 바탕으로 10 km 해상도의 한반도 풍력자원지도를 작성하고 현재 이를 일반에 공개하고 있다⁸⁾.

전체적인 풍력자원지도는 대체로 한 국가 전체의 풍력자원 평가를 목적으로 작성되기 때문에 그들의 공간해상도가 낮은 편이다. 그러나 최근 전산기술과 기상관측의 동화기술의 발달과 함께 풍력자원의 예측정확도가 높아지고 있으며, 다양한 공간해상도의 자원지도 작성이 가능해졌다. 이 등⁹⁾은 풍력자원 평가에 있어서 초기자료의 공간해상도가 중요한 요인으로 작용함을 보였으며, 이 등¹⁰⁾은 해안선이 복잡한 광양지역을 대상으로 수치모형의 공간해상도

가 국지적인 순환장의 풍향변화에 영향을 미친다고 하였다. 관측을 대상으로 한 연구에서도 기상관측지의 공간적인 특성 반경이 풍력자원 평가에 반영됨을 확인하였다¹¹⁻¹³⁾.

이러한 연구는 풍력자원지도를 평가하는 수치모형의 공간 해상도가 국지 순환장의 변화를 유발하고 이는 다시 풍력자원 평가에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그러므로 풍력자원지도의 공간해상도와 풍력자원의 예측정확도간의 관계를 명확히 하여야 한다. 본 연구는 서로 다른 세 가지 공간해상도를 가진 수치실험을 통하여 풍력자원 지도를 생성하고, 이들을 상호 비교함으로써 풍력자원지도의 공간해상도가 자원 평가 정확도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 풍력자원지도

2.1.1. 수치모형

풍력에너지를 개발함에 있어서 풍력자원의 공간 분포를 평가하는 것은 매우 중요한 과정의 하나이다. 본 연구에서 작성된 풍력자원지도는 3차원 수치 대기 모형 분석 결과에 바탕을 두고 있다. 지도 작성에 사용된 수치모형은 미국대기연구소에서 개발된 MM5로 비정역학 기압 준거 좌표계로 구성된다¹⁴⁾. 이 모형은 우리나라를 비롯하여 여러 국가의 기상청 현업모형으로 적용되었던 모형으로 높은 계산안정성과 신뢰성을 확보한 모형이다. 그리고 다중 등기격자 구성이 가능하여 높은 공간해상도의 국지 순환장을 예측할 수 있다. 또한 다양한 물리모형을 포함하기 때문에 다양한 중규모 기상현상을 연구하는데 사용되고 있다.

풍력자원지도에 적용된 격자구조와 물리과정은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 9 km, 3 km, 1 km의 서로 다른 공간해상도를 가진 풍력자원지도를 작성하고 이를 바탕으로 비교하였다. Fig. 1은 각각의 풍력자원 지도의 도메인을 의미한다. 저해상도인 9 km 격자의 풍력자원지도 계산영역은 한반도를 포함한 동아시아를 대상으로 하고 있으며, 160 × 140의 격자수로 구성되어 있다. 중해상도인 3 km 격자 바람지도의 경우, 한반도 전체를 포함하며, 수평격자는 184 × 157 로 구성되어 있다. 그리고 마치

Table 1. The grid system of the horizontal dimensions and selected physical options.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal Grid	160×140	184×157	205×205
Resolution (km)	9	3	1
Vertical Grid	33 Layers		
Physical Option	Grell Cumulus Scheme Eta PBL Scheme Mixed Phase Moisture Scheme RRTM Longwave Radiation Scheme Five-Layer Soil Model Surface Scheme		
Run Period	4 months (March, August, October, and December in 2007)		

막 고해상도인 1 km 격자의 경우 한반도 남서해안을 대상으로 하고 있으며 격자수는 205 × 172 이다. 본 연구에서는 복잡한 해안선과 산악이 구성된 한반도 남서해안을 대상으로 실시하였다. 연직 격자는 연직 열 플럭스 및 운동량 플럭스가 급격히 변화하는 지표면 부근을 정확히 평가하기 위하여 지표로 갈수록 조밀하게 구성한 연직 부등 간격 격자로 구성되었다.

그리고 이들 격자에 사용한 물리옵션은 동일하게 적용하였는데, 복사과정은 RRTM, 구름 물리과정은 MPMS (Mixed Phase Moisture Scheme), 적운 물리과정은 Grell 방안, 경계층 모수화는 Eta 방안을 사용하였다. 지중은 5층의 다층구조 모형을 적용하여 지중, 지표 온도 및 수분량을 평가하였다.

초기 및 경계조건은 한국 기상청에서 제공하는 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)를 사용하였다. RDAPS는 국지적인 지형강제력을 잘 모사하며, 자료동화효율이 높게 나타나는 특성이 있다⁹⁾. RDAPS를 이용한 초기 및 경계조건은 저해상도 풍력지도 제작에 이용된 도메인에 적용되고 나머지 도메인은 상위 도메인에서 계산된 값을 초기 및 경계조건으로 사용하였다. 그리고 수치계산 정확도 향상을 위하여 관측자료 동화가 필

요하다. 이 과정을 통하여 수치계산 지속성에 의한 오차가 감소하는데 본 연구에서는 위성자료를 통한 해상풍 자료동화와 지상 및 연직 관측 자료의 기상 자료동화를 적용하였다.

2.2. 분석기간과 종관상황

바람지도 공간해상도에 따른 영향을 계절별로 보기 위하여, 각 계절별 총 4개월 바람지도를 분석하였다. 분석에는 2007년 3, 8, 10, 12월의 기상자료가 사용되었는데, 종관적인 대기 상태가 급격히 전이되는 겨울반구의 변화 특성을 보기 위하여 8, 10, 12월을 여름, 가을, 겨울의 대표월로 설정하였다. Fig. 2는 기상청 68개 기상대급 자료를 바탕으로 관측한 대상 월의 평균 온도 분포를, Table 2는 평년 월평균에 대한 평균기온과 강수량 편차를 나타낸 것이다. 기온 분포는 계절에 상관없이 태백산맥 등 산악지역에서 낮게 나타나고, 연구 대상지역인 남서해안 지역에서 높게 나타난다. 2007년 3월은 상순에 꽃샘추위 등으로 차가운 날씨를 나타내었으나 중후반의 따뜻한 날씨로 인하여 전체적인 월평균기온이 평년에 비하여 높게 나타나는데 순천의 경우 1.8도 높다. 이러한 온난화 현상은 한반도 전체에 나타나는데, 전월의 청주의 경우 평년에 비하여 월평균기온이

Table 2. Differences of monthly mean temperature and precipitation in 2007 and ten years from 1997.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nob	Dec
Temperature Difference(℃)	1.6	2.7	1.0	-0.2	0.5	0.4	-0.6	0.8	0.9	0.7	-0.2	1.0
Precipitation Difference (0.1 mm)	-18	8	51	-56	7	-76	-10	63	250	4	-37	4

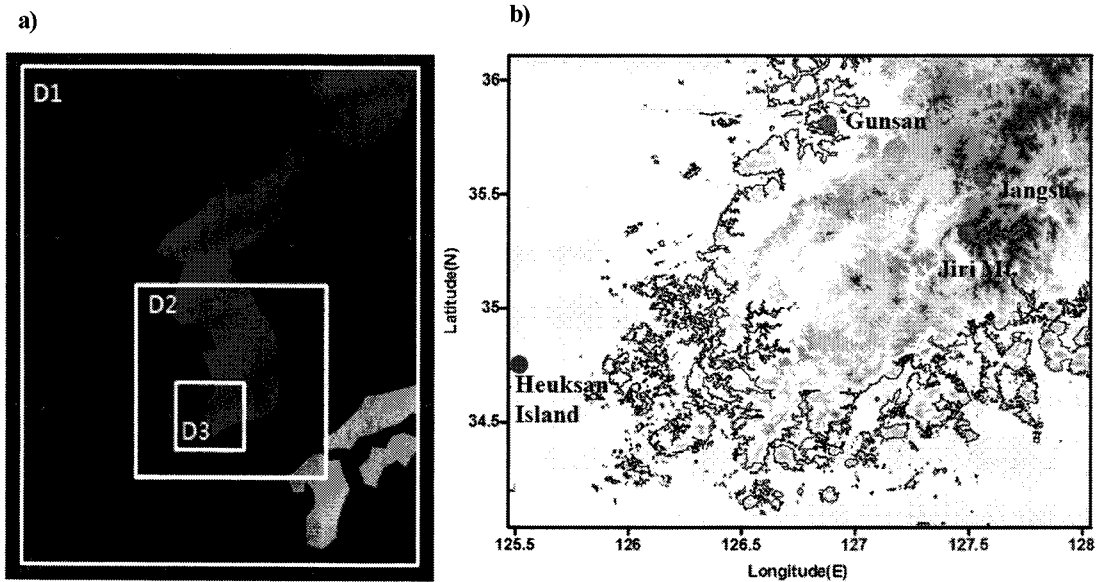


Fig. 1. a) Nested model domains and b) topography of finest domain (D3) with 1km horizontal resolution. Circles in D3 means the locations of sites for statistic analysis in section 3.2.

4.8 °C 높게 나타나 지속적인 온난화 영향을 확인할 수 있다. 8월의 경우 군산 등 서남해안의 경우 월평균 온도가 28 °C까지 상승한다. 그리고 온도의 경년 변화상 전년에 비하여 약하지만 약 1 °C 정도 상승한 결과를 보인다. 그리고 상순 중국에서 발달한 기압골이 통과하면서 기압골 통과로 인하여 초반 많은 강수가 발생하여 평년 강수량에 비해서도 높게 나타났다. 10월의 경우 지역에 따른 온도차이가 다른 계절에 비하여 작게 나타난다. 종관적으로 고기압이 강화되면서 맑은 날씨가 지속되었고 전국 평균 기온이 15.1 °C로 평년월평균기온에 비하여 0.7 °C 높게 나타나 지속적인 온난화가 나타났다. 12월의 경우 군산 등 서남해안에서 온도가 높게 나타난다. 전체적으로 대륙 고기압이 약하게 나타나기 때문에 평년에 비하여 높은 월평균 기온을 보인다. 특히 이 달은 1973년 이후로 가장 높은 월평균 온도를 기록하였다. 그리고 전체 기온 증가율을 보면 4, 7, 11월을 제외하고 모든 달의 월 평균기온이 전년에 비하여 증가하였음을 볼 수 있다. 이러한 지구온난화 과정에서 풍력자원의 변화에 대한 고려도 필요하다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상장 분석

Fig. 3은 수치바람지도에 의해 계산된 공간해상도별, 계절별 평균 풍속을 나타낸 것이다. 전체 계절에서 평균 풍속이 지상에서는 4 m/s, 발전기가 위치한 고도로 가정한 100 m 고도에서는 5 m/s 이상으로 나타난다. 특히 봄철인 3월의 풍속은 평균 7 m/s로 매우 높게 나타난다. 그리고 바람지도 해상도에 따른 풍속을 보면 모든 계절 3 km 해상도에서 가장 강한 지표면 바람을 모사하고 있다. 계절적으로 여름과 겨울철 바람지도 공간 해상도에 따른 풍속 분포가 지표층과 100 m 고도에서 유사하지만 봄과 가을에는 서로 다른 분포를 하고 있다. 이러한 분포는 여름과 겨울철에는 상대적으로 유사한 종관기상상태가 지속되기 때문에 상하층간의 분포차이가 적은데 비하여 봄과 가을의 경우 종관 기상상태가 급격히 변화하기 때문에 상하층간의 분포차이가 발생한다고 볼 수 있다. Fig. 4는 각 계절별 바람장미를 공간해상도별로 나타낸 것이다. 종관적 계절풍계인 여름철 남동풍과 겨울철 북서풍이 명확히 나타난다. 봄과 가을철의 경우 여름과 겨울에 비하여 다양

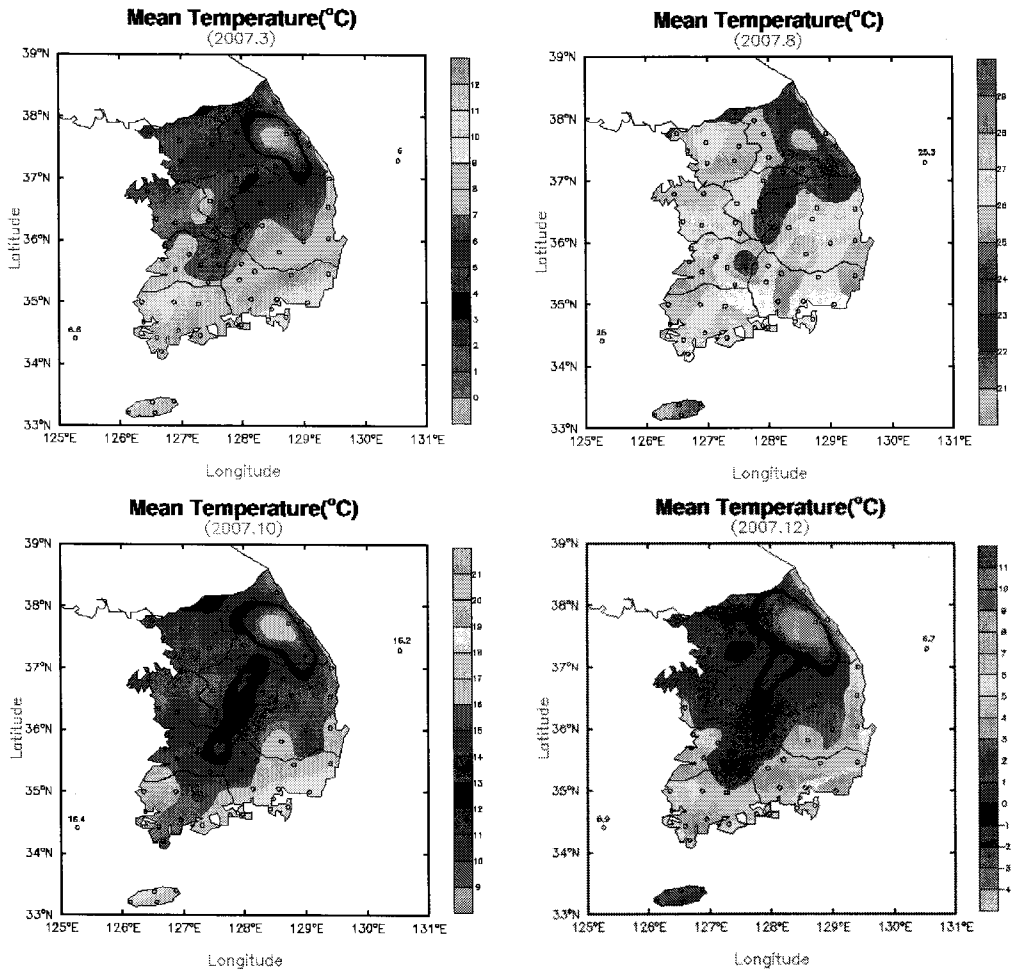


Fig. 2. Distribution of monthly mean temperature at March, August, October, and December 2007.

한 풍계가 나타난다. 그리고 공간해상도에 따른 풍계의 변화를 보면, 전체 계절에서 약간씩 달라진다. 즉 봄철의 경우 9 km 해상도에서는 북서풍이 우세하였으나, 1 km 해상도에서는 북풍이 우세하게 나타나며, 여름철의 경우 9 km에서는 남풍이 우세한데 비하여 1 km에서는 남동풍이 우세하다. 이러한 차이는 공간 해상도가 높아짐에 따라 국지지형 모사정확도가 향상되는데, 이러한 해상도에 따른 지형적인 요인이 바람장 모의에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 그리고 계절에 상관없이 1 km 공간 해상도에서 풍향의 변동이 9 km 보다는 적게 나타난다. 이것 역시 지형에 의하여 특정 풍향대가 강하게 나타나는 것을 의미한다.

Fig. 5는 여름과 겨울철의 9 km, 3 km, 1 km 공간 해상도의 바람벡터를 나타낸 것이다. 그림상의 색은 풍속의 강도를 나타낸다. 풍속분포를 보면 공간 해상도가 높아짐에 따라 풍속의 분포가 세밀해짐을 알 수 있다. 이러한 풍속 분포는 지형을 따르는데 소백산맥과 노령산맥에 의한 풍속 분포 구조가 명확하게 나타난다. 그리고 최대 풍속 역시 해상도가 높을수록 높게 나타나는데 이것은 공간해상도가 높을수록 수치모형 상에 나타나는 지형의 기복이 뚜렷해지기 때문이다. 여름과 겨울의 풍속 분포를 비교하면 차이가 나타나는데, 한반도내 최대풍속과 최소풍속의 차이는 겨울철에 더욱 뚜렷한데 이것은 대기안정도와 관련이 있다. Lee와 Kimura¹⁵⁾는 2차

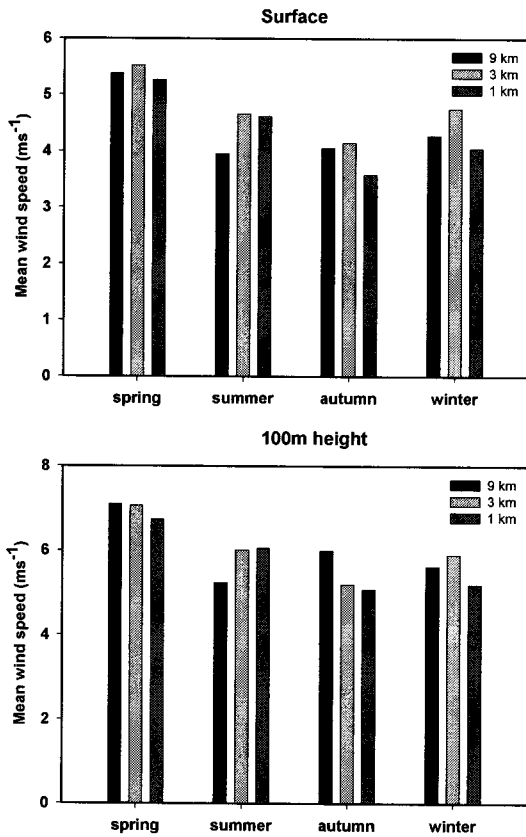


Fig. 3. Mean value of wind speed estimated for different spatial resolutions in wind map.

원 수치실험을 통하여 대기안정도가 중규모 기상장의 강도를 결정하는 중요한 요인이라고 설명하고, 특히 대기안정도가 강할 경우 지형강제력이 강하게 작용한다고 하였다. 그러므로 대기안정도가 높은 겨울철에 한반도의 지형강제력이 강하게 나타나고, 이런 강한 지형강제력은 평지와 산악의 풍속의 차이를 크게 한다고 판단된다.

지역적 특성이 다른 4개 지역에서 풍력자원지도 공간해상도가 풍력자원 평가에 미치는 영향을 파악하기 위하여 바람장 일변화의 시계열 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 4개의 지역은 각각 해안 도시를 대표하는 흑산도, 연안지역의 군산, 내륙지역인 장수 그리고 산악지역을 대표하는 지리산이다. 4개 관측지의 해발고도는 각각 68 m, 74 m, 407 m, 853 m 이다. Fig. 6은 서로 다른 해상도에서 계산된 풍속과 관측 풍속의 일변화를 나타낸 것이다. 그림

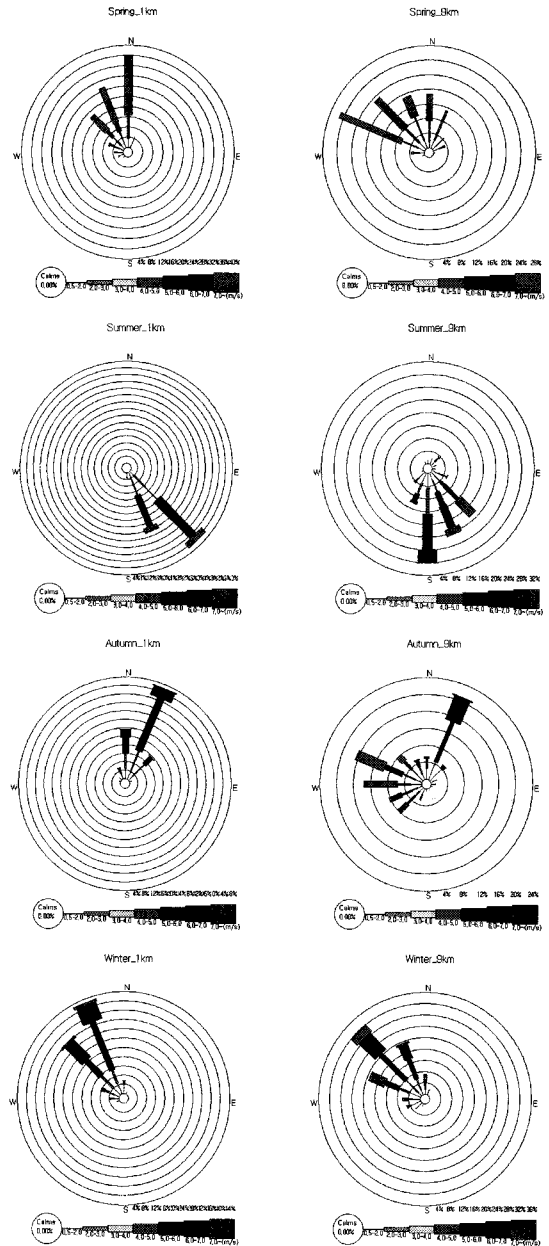


Fig. 4. Wind roses for 1 km (left panels) and 9 km (right panels) resolution at each season.

은 상대적으로 공간해상도의 차이가 많이 나는 봄(3월)과 가을(10월)을 나타낸 것이다. 약간의 차이는 있지만 모든 공간 해상도에서 군산과 장수의 일변화는 관측과 유사하게 나타난다. 그러나 산악과 도시의 경우 그렇지 못하다. 이것은 관측지의 대표

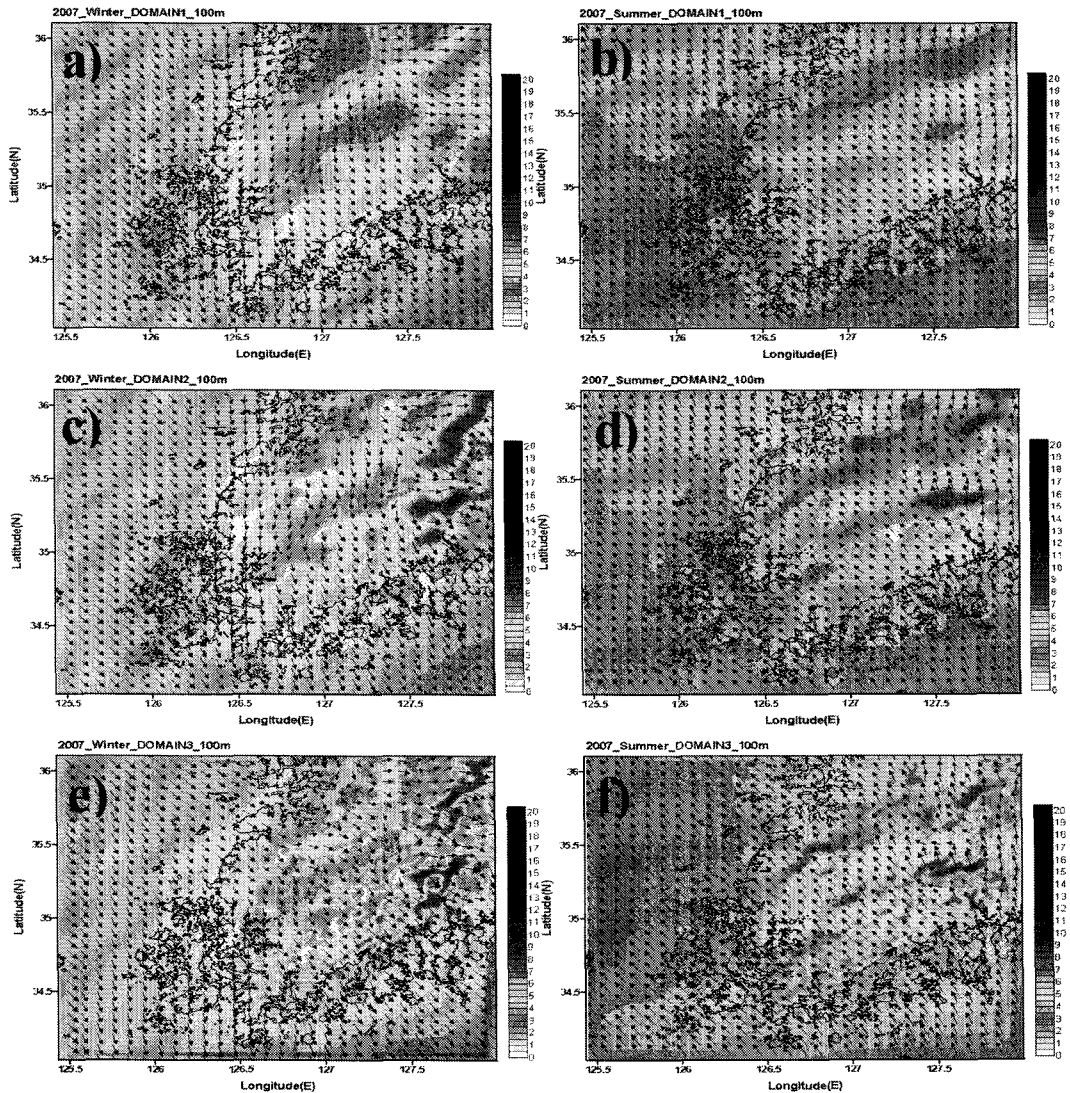


Fig. 5. Monthly mean wind vectors estimated at 100 m height for 9 km (a, b), 3 km (c, d), and 1 km (e, f) resolutions at summer (right panels) and winter (left panels) seasons. Color indicates the wind speed.

성에 관한 문제로 산악의 경우, 관측에 이용되는 자동기상관측장비의 위치와 풍력자원지도를 생산하는데 사용된 수치모형의 격자의 위치를 정확히 일치시키기가 어렵기 때문이다¹¹⁾. 그리고 모형내 각 격자의 풍속은 격자의 평균을 의미하지만 관측치는 지점의 값을 의미하기 때문에 이들의 차이에서 발생하는 오차라고 볼 수 있다.

각 해상도별 풍속 변화를 보면 하나의 특징을 볼 수 있는데, 연안에 위치한 군산의 해상도별 풍속의

차이가 크지 않다. 반면 내륙에 위치한 장수의 경우 각 해상도별 풍속 변화의 차이가 크게 나타난다. 흑산도의 풍속변화는 9 km 해상도와 3 km 해상도의 풍속이 매우 유사하게 나타나며, 지리산의 경우 3 km와 1 km의 해상도의 풍속변화가 유사하게 나타난다. 즉 지역적인 위치에 따라 자원지도의 공간해상도에 따른 변화 정도가 다르게 나타난다. 먼저 도서지역은 일반적으로 지리적 규모가 작기 때문에 9 km, 3 km 해상도의 수치대기에서는 정확하게 묘사

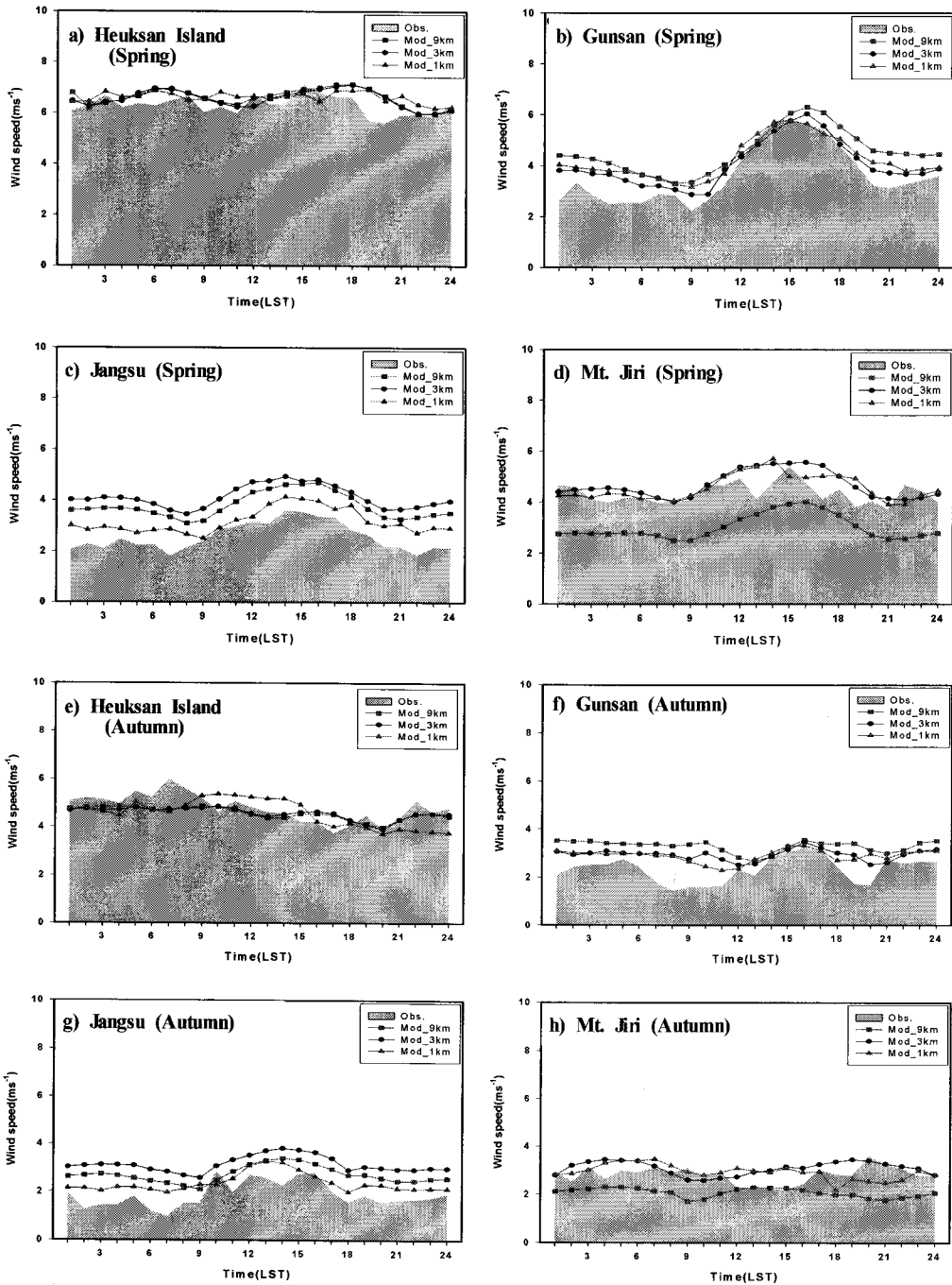


Fig. 6. Diurnal variation of estimated and observed wind speed at four sites (Heuksando, Gunsan, Jangsu, and Mt. Jiri) for spring and autumn.

되지 못한다. 따라서 이러한 해상도에서는 도서의 존재를 인식하지 못한다. 그러나 1 km 해상도의 수

치대기는 도서를 지리적으로 인식하여 이들 도서의 지형적인 강제력이 작용한다. 그러므로 3 km와 9

Table 3. Statistics values based on wind speed data observed and calculated at four target sites.

Statistics	Spatial resolution of wind map		
	9 km	3 km	1 km
RMSE (m/s)	0.86	0.63	0.65
IOA	0.56	0.63	0.69

km 해상도의 바람지도에서는 비슷한 경향성을 가진다. 연안지역인 군산의 경우 육지에 위치하고 지형적으로 평탄하기 때문에 공간해상도에 따른 바람장의 차이가 적게 나타난다. 내륙에 위치한 장수는 상대적으로 높은 고도에 위치하기 때문에 1 km, 3 km, 9 km의 해상도에 따라 바람장의 차이가 비교적 균등하게 나타난다. 마지막 지리산의 경우 고도가 높은 독립적인 산악으로 구성되어 1 km 와 3 km 해상도에서는 잘 표현되기 때문에 이들 해상도의 바람장 차이는 크지 않다. 그러나 9 km 해상도에서는 아직 지리산의 표현정도가 불충분하기 때문에 앞의 1 km와 3 km 해상도의 바람장과 차이가 나타난다고 볼 수 있다. 그러므로 풍력자원지도의 정확한 평가를 위해서는 해석 가능한 공간규모 해상도를 먼저 파악하고 풍력자원지도를 작성 평가하여야 한다. 그리고 이들 4지역의 관측자료와 비교한 전체질 풍속의 RMSE (Root Mean Square Error)과 IOA (Index of Agreement) 값을 보면 (Table 3), 전체적으로 RMSE는 0.9 m/s 이하이며, IOA는 0.5 이상으로 나타난다. 따라서 각각 해상도의 풍력자원지도의 신뢰성은 가지고 있다고 판단된다. 특히 해상도가 가장 높은 1 km 바람지도에서는 IOA가 0.69로 나타나 상대적으로 관측 자료와 잘 일치한다. 비록 통계치에 적용된 지점의 수가 제한적이지만, 한반도 바람지도의 경우 1 km 해상도에서 지형특성이 잘 표현되는 것으로 판단된다.

3.2. 풍력자원 평가

일반적으로 풍력자원지도는 발전기 설치고도의 풍력에너지 출력밀도 (power density)로 평가할 수 있다. 이는 풍속의 세제곱에 비례하는 적분식으로 정의된다.

$$P(V) = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV = \frac{1}{2} \rho \cdot c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{\kappa} \right) \quad (1)$$

여기서 변수로는 밀도(ρ)와 풍속(V)이며, 풍속

분포의 평균값을 나타내는 형상계수(c)와 풍속 분포의 편차의 크기를 나타내는 등급계수(κ)로 표현되는 Weibull 분포를 적용할 수도 있다. 본 연구에서는 수치실험을 바탕으로 도출된 격자 풍속을 이용하여 풍력에너지 밀도를 구하였다.

이러한 출력밀도는 풍속뿐 아니라 대기의 밀도 역시 중요한 요소이다. 그러나 일반적인 풍력자원 평가에 적용되는 공기의 밀도는 상수 (0°C 1기압 상태하에서 1.293 kg/m^3)로 두고 계산한다. 그러나 정확한 풍력자원 지도 작성을 위해서 계절에 따른 공기의 밀도변화를 고려해야한다. 전체 자료를 이용하여 공기의 밀도변화를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 1 km 와 9 km 해상도의 풍력에너지 출력밀도를 나타낸 것이 Fig. 7이다. 먼저 공간해상도에 따라 출력밀도는 1 km 해상도의 자료에서 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 풍력의 크기가 해상도가 높을수록 높게 평가되기 때문이다. 밀도의 변화를 고려한 경우가 전체적으로 고려하지 않은 경우보다 풍력에너지 출력밀도가 높게 나타난다. 특히 산악지역인 지리산 부근에서 차이가 50 W/m^2 로 최대를 보인다. 이러한 경향성은 9 km 공간해상도 자료에서도 동일하게 나타난다. 그러나 그들의 차이는 1 km 해상도 자료보다 크지 않다.

일반적으로 기상 수치모형으로 계산된 기상요소는 격자의 평균치를 의미한다. 즉 9 km 격자 수치실험에서 계산된 바람장은 81 km^2 의 면적 대표치라고 할 수 있으며 1 km 격자 수치모형의 결과는 1 km^2 의 대표치라고 볼 수 있다. 그러므로 9 km 해상도 1개 격자의 바람은 1 km 해상도내 격자 81개의 바람장에 대응한다. 실제 풍력자원지도의 평가에는 이러한 공간해상도에 따른 풍력에너지의 차이가 고려되지 않고 격자점에 대한 기상 요소를 그대로 반영하는 경우가 많다. 따라서 공간해상도의 차이에 따른 풍력에너지의 차이를 정량적으로 파악할 필요가 있다.

Fig. 8은 9 km 해상도의 단위격자 면적 (81 km^2)과 동일한 면적의 풍력에너지 출력 밀도를 3 km, 1 km 해상도에서 계산한 산포도이다. 비교자료는 Fig. 6에서 비교한 4개 지점의 계절별 평균출력밀도이다. 여기서 연직축은 1개의 격자를 전체 면적의 대표치로 가정하여 계산한 것 (case Single)이고, 수평축은

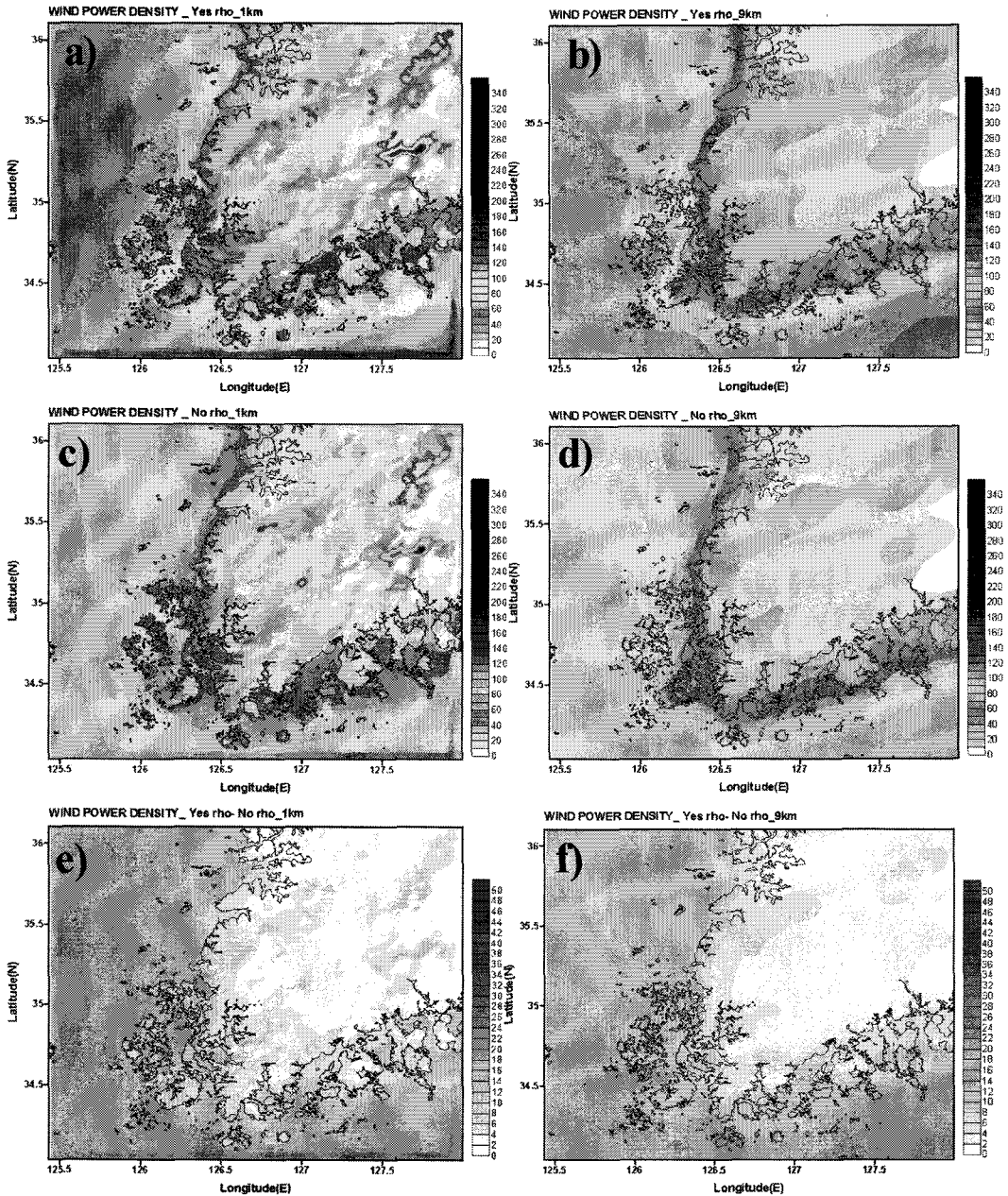


Fig. 7. Distribution of wind power density for 1 km (left panels) and 9 km (right panels) spatial resolutions with (a, b)/without (c, d) the consideration of air density variation and their differences (e, f).

전체 면적내 격자에서 계산된 풍속을 개별적으로 고려하여 풍력에너지를 계산한 것 (case Multi)이다. 3 km 해상도의 경우, 1개의 대표치로 계산한 것과 각각의 자료를 통합한 것의 차이가 크지 않음을 알

수 있다. 반면 1 km 해상도의 경우 군산을 제외한 다른 지역의 경우 차이가 크게 나타난다. 장수와 흑산도는 case Multi가 case Single에서 계산된 풍력에너지를보다 과대모의를 하고 있으며, 지리산의 경우

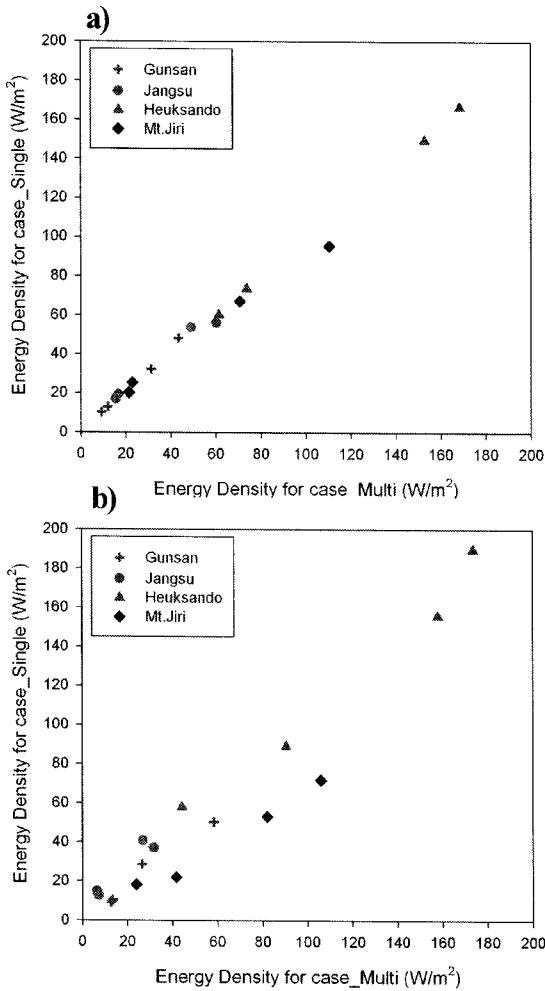


Fig. 8. Scatter plot of mean energy density estimated in case Single and case Multi with a) 3 km and b) 1 km resolutions.

반대로 과소 모의를 하고 있다. 이는 풍력에너지 산정방식에 따라 지역적으로 오차가 발생할 수 있음을 의미한다. 흑산도 관측자료는 육상에서 관측한 것으로 평균 격자를 사용하는 모델자료와 비교할 때 상대적으로 작게 표현된다. 따라서 전체 면적을 고려할 경우 풍속이 강한 영역이 포함되어 각각의 바람을 개별적으로 통합한 case Multi가 강하게 된다. 반면 지리산의 경우 대표가 되는 바람자료가 산악부에서 생산되기 때문에 다른 지역에 비하여 강하다. 그러므로 강한 바람장을 대표치로 사용한 case Single의 풍력 에너지가 강하게 산정된다. 그러

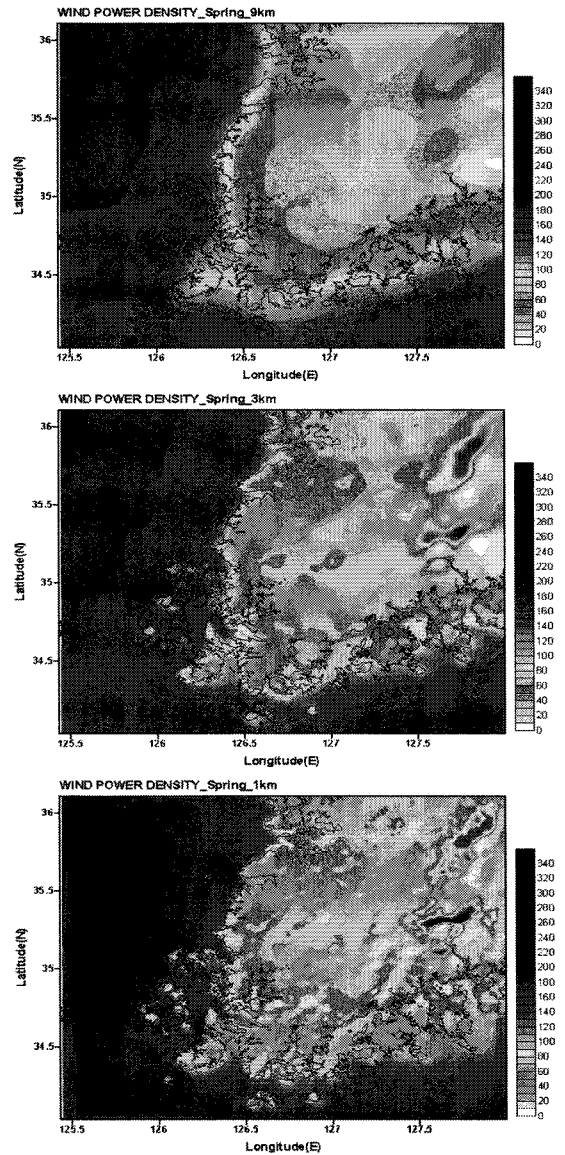


Fig. 9. Wind power density for a) 9 km, b) 3 km, and c) 1 km resolution wind map at Spring season.

므로 풍력에너지 산정에 있어 격자 대표 바람장의 특성이 바람지도의 공간해상도에 따라 달라지기 때문에 에너지 산정에 이용된 격자의 지리적 특성과 공간해상도의 관계를 먼저 파악하여 전체 풍력자원을 평가하여야 한다.

Fig. 9는 평균 풍속이 가장 강한 3월의 공간해상도별 풍력에너지 출력밀도를 세 번째 도메인에 맞게 나타낸 것이다. 풍력에너지 출력밀도상 공간 해

상도가 높을수록 에너지 출력밀도 역시 높게 나타난다. 9 km 해상도의 경우 연구대상지역 전체가 100 W/m² 이하로 나타나지만 1 km 해상도 격자에서는 지리산과 덕유산 등 중심으로 300 W/m² 이상의 높은 에너지 출력밀도가 나타난다. 에너지 출력밀도 분포상 한반도 남서지역의 경우 연안지역과 지리산과 덕유산 등 소백·노령산맥의 대표적인 산악지역에서 에너지 출력밀도가 높게 평가된다. 그러므로 풍력자원지도의 공간해상도에 따른 에너지 출력밀도 평가에 차이가 발생할 수 있으며, 이들의 차이는 풍력발전의 경제성에 영향을 미친다. 따라서 정확한 에너지 출력밀도 산정은 풍력발전의 효율성을 결정하는 주요한 요인으로 작용하기 때문에 정확도 높은 고해상도 공간규모 풍력자원지도의 작성이 요구된다.

4. 결 론

에너지 수요증가와 화석연료의 고갈에 따른 에너지 문제해결하기 위해 신재생에너지의 확보가 중요하다. 신재생에너지 중 기술숙직도와 경제성이 높은 것으로 평가되는 풍력자원 확보를 위한 연구의 일환으로 수치대기 공간 해상도에 따른 풍력자원의 예측정확도를 평가하였다. 수치지도 작성에는 3차원 대기역학 모형인 MM5를 사용하였으며, 초기 및 경계조건으로는 RDAPS를 사용하였다. 연구기간은 2007년 각 계절별 1개월씩 총 4개월 (3, 8, 10, 12월)의 자료를 이용하였다. 공간해상도가 각각 9 km, 3 km, 1 km의 서로 다른 공간격자로 구성된 자원지도를 작성하고 이들의 특성을 상호 비교하였다. 그리고 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1) 발전기 설치 높이인 100 m의 바람장이 지표면 바람장보다 강하며, 모든 계절에서 3 km 해상도의 바람이 가장 강하게 나타났다. 그리고 해상도에 따른 평균 풍속의 고도 분포 경향성은 여름, 겨울철은 비슷하지만 봄과 가을철은 다르게 나타난다. 이는 종관풍의 강도에 따른 것으로 보인다.

2) 해상도가 높을수록 풍속 분포가 복잡하게 나타나고 국지적인 지형구조와 비슷하게 나타나는 경향이 있다. 이는 풍력자원지도의 공간해상도가 높을수록 지형의 기복이 명확히 묘사되기 때문이다.

3) 관측치와 비교하면, 해상도가 높을수록 관측

치에 가까워지는 경향이 있다. 특히 지형고도가 높은 지역에서 일치정도가 높게 나타난다. 그리고 흑산도의 풍속은 9 km와 3 km 해상도에서 유사한 일변화 경향성을 나타내고, 지리산의 경우 3 km와 1 km의 해상도에서 유사한 경향성을 나타낸다. 이것은 도서지역과 산악지역의 공간표현이 바람지도의 공간해상도에 따라 달라지기 때문이다.

4) 풍력에너지 출력밀도 평가에서, 일정 면적에 1개의 대표치를 적용하여 풍력에너지를 계산한 경우보다 각각의 풍력에너지를 독립적으로 계산하여 구한 풍력에너지의 출력밀도가 높게 나타나는 경향이 있다. 그리고 전체적으로 해상도가 높을수록 산정되는 풍력에너지 출력밀도가 높게 나타난다.

이러한 결과를 바탕으로 풍력자원 지도 작성에 근간이 되는 지표면과 발전기 높이의 바람은 공간해상도에 따라서 달라지는 것을 볼 수 있다. 그리고 풍력자원을 평가하고자하는 지역의 지리적 특성 역시 풍력자원 평가에 중요한 요인으로 작용한다. 그러므로 풍력자원의 정확도 평가는 공간적인 해상도의 타당성 평가를 바탕으로 실시되어야 한다. 이는 궁극적인 풍력발전의 경제성 평가 정확도와도 관련이 있다. 본 연구는 평균 바람장을 바탕으로 평가를 실시하였는데, 바람강도의 시간변동성을 바탕으로 한 출력밀도의 변동에 관한 추가적 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업 내 “한반도 해역 해상풍 분석시스템 개발 및 해상 풍력자원지도의 기상학적 검증” 사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

- 1) Global Wind Energy Council, 2007, Global Wind Energy 2006 Report, 42-80.
- 2) European Wind Energy Association, 2007, EWEA's response to the European Commission's Green Paper towards a future maritime policy for the union: a European vision for the ocean and seas, Brussels,

- 1-21.
- 3) American Wind Energy Association, 2004, Global Market Report 2004, Washington, D.C., 1-60.
 - 4) Yim S., Fung J., Lau A., Kot S., 2007, Developing a high-resolution wind map for a complex terrain with a coupled MM5/CALMET system, *J. Geophys. Res.*, 112(d5), 5106.
 - 5) Frank H. P., Rathmann O., Mortensen N. G., Langberg L., 2001, The numerical wind atlas- the KAMM/WAsP method, Risø National Laboratory, Roskilde, Risø - R - 1252(EN), 60pp.
 - 6) 김현구, 이화운, 정우식, 2005, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구: I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력 자원 평가, *한국대기환경학회지*, 21(1), 1-10.
 - 7) Brower M. C., Bailey B., Zack J., 2001, Applications and validations of the MesoMap system in different climatic regimes, *Proc. of wind power 2001*, American Wind Energy Association, Washington, D.C., 1-92.
 - 8) 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 최현정, 김동혁, 2006, 수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축, *한국태양에너지학회지*, 26(4), 31-38.
 - 9) 이순환, 이화운, 김동혁, 김현구, 2007, 한반도 풍력 자원 평가를 위한 초기 공간해상도와 위성자료 동화의 관계분석, *한국대기환경학회지*, 23(6), 653-665.
 - 10) 이화운, 전원배, 이순환, 최현정, 2008, 복잡 연안지역의 지표면 자료 상세화에 따른 수치 기상장 분석, *한국대기환경학회지*, 24(6), 649-661.
 - 11) 이순환, 김신희, 류찬수, 2006, 지형자료 해상도에 따른 대기유동장 변화에 관한 수치연구, *한국환경과학회지*, 15(12), 1141-1154.
 - 12) 이순환, 김민정, 이화운, 2007, 국지규모 풍력에너지 평가를 위한 기상관측 자료의 영향 반경 평가, *한국대기환경학회지*, 23(5), 585-595.
 - 13) Lee S. H., Kim Y. K., Kim H. S., Lee H. W., 2007, Influence of dense surface meteorological data assimilation on the prediction accuracy of ozone pollution in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula, *Atmos. Environ*, 41, 4451-4465.
 - 14) Dudhia J., Gill D., Manning K., Wang W., Bruyere C., 2005, PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 3), 1-172.
 - 15) Lee S. H., Kimura F., 2001, Comparative studies in the local circulations induced by land-use and by topography, *Bound. Layer Meteor.*, 101, 157-182.