

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 26, No. 4, 2006

수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축

김현구*, 장문석*, 경남호**, 이화운***, 최현정***, 김동혁***

*한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 (hyungoo@kier.re.kr)

**한국풍력기술개발사업단 (nhkyong@kier.re.kr)

***부산대학교 대기과학과 (hwlee@pusan.ac.kr)

Establishment of the Low-Resolution National Wind Map by Numerical Wind Simulation

Kim, Hyun-Goo*, Jang, Moon-Seok*, Kyong, Nam-Ho**,
Lee, Hwa-Woon***, Choi, Hyun-Jeong***, Kim, Dong-Hyuk***

*Wind Energy Research Group, Korea Institute of Energy Research

**Korea Wind Energy Development Organization

***Dept. of Atmospheric Science, Pusan National University

Abstract

The national goal of wind energy dissemination has to be determined rationally based on technically available wind resource potential. For an accurate and scientific estimation of wind resource potential, a wind map is requisite. This paper introduces the national wind map of Korea established by numerical wind simulation. Therefore, quantification of national wind resource potential is now possible and is anticipating to be used as a core index for policy and strategy building of wind energy dissemination and technology development.

Keywords : 풍력자원(Wind resource), 바람지도(Wind map), 수치바람모의(Numerical wind simulation)

1. 서 론

풍력발전을 이용하는 대부분의 국가에서는 정책적으로 풍력발전 보급목표의 설정을 위해 풍력자원 지도를 작성하여 사용하고 있다. 참고로 풍력자원

지도(wind resource map)란 풍력자원에 대한 제반 정보를 지리공간 상에 투영한 것으로 기상학적 요소인 바람에 한정하여서 바람지도(wind map)라고 한다. 풍력발전사업이 정상과도에 도달한 국가에서는 수치바람모의(numerical wind simulation)

접수일자:2006년 9월 8일, 심사완료일자:2006년 11월 17일

Journal of the Korean Solar Energy Society Vol. 26, No. 4, 2006

31

최신기술을 도입하여 풍력자원지도의 정확도를 지속적으로 향상시킴으로써 정책수립의 핵심지표로 활용함과 동시에 풍력발전 유망후보지 발굴에 활용하고 있다. 반면 우리나라는 복잡지형(complex terrain) 및 복합기상 등의 난제로 인해 풍력발전 단지보급 및 풍력발전기 개발에 비하여 바람지도 작성성이 상대적으로 늦어짐에 따라 보급사업 및 기술개발 전략수립에 다소간의 논란이 있는 것이 사실이다. 즉, 우리나라 풍력자원량이 신재생에너지 보급계획을 만족시킬 정도로 충분한가? 지금의 추세로 풍력단지를 개발한다면 국산화 풍력발전기 보급을 위한 내수시장을 얼마나 확보할 수 있는가? 등의 정책에 대한 근본적인 질문이 계속 제기되고 있다.

이에 본 연구에서는 그동안 지연되었던 국가 바람지도를 수치바람모의에 의하여 작성하고 풍속등급별 면적을 산출함으로써 풍력발전 보급목표의 타당성을 과학적으로 뒷받침하는 핵심자료를 제공하였다. 또한 기술선도국가의 바람지도 개발사례를 분석하여 저해상도(수평 공간해상도 10x10km) 바람지도를 우선적으로 개발함으로써 향후 고해상도(1x1km) 바람지도 작성을 위한 기술기반을 단기간에 구축하였다. 또한 작성된 저해상도 바람지도의 연평균풍속은 상세지형으로 고도보정한 후 한국에너지기술연구원의 풍력자원 측정결과와 비교·검증함으로써 바람지도의 정확도와 유효성을 기상통계학적으로 입증하였다.

2. 풍력발전과 바람지도

2.1 바람지도의 중요성

풍력발전에서 바람지도는 모든 활용주체에게 매우 중요한 정보를 제공하여 준다. 즉, 정책/보급 분야에는 과학적인 방법에 의해 바람지도로부터 산출된 풍력자원량은 보급목표 설정 및 기술개발전략 수립의 당위성과 합리성을 입증하여 준다. 또한 풍력사업 분야에는 바람지도로부터 유망후보지를 선정하고 현장측정에 앞서 사업타당성 평가를 할 수

있도록 평가자료를 제공함으로써 사업위험성의 경감 및 평가비용의 절감효과가 있다. 일반적으로 풍력발전 단지개발 사업에서는 풍력단지의 에너지생산량 예측을 위해 현장에서의 실측자료를 해석모델에 입력하여 국소 바람지도(micro-siting)를 작성하지만 실측자료 대신 국가 바람지도의 해석결과를 입력함으로써 개략적인 에너지생산량 예측이 가능하다. 참고로 미국이나 일본 등은 이러한 사전평가 방식에 의해 현장측정 소요경비의 절감과 동시에 단지개발사업의 불확도에 의한 위험성을 제거하고 있다.

2.2 해외 바람지도 현황

풍력 발전을 선도하고 있는 유럽에서는 이미 오래전 풍력발전 개발 시작단계부터 국가 바람지도를 작성하여 정책수립 및 개발사업에 활용해오고 있다. 최근에는 바람지도의 효용성 향상을 위해 새로운 수치바람모의 기법을 도입하여 바람지도의 해상도를 향상시키거나(미국, 덴마크 등) 신규로 작성하고 있으며(일본, 중국, 독일 등) 지리정보체계(Geographical Information System; GIS)와 연계하여 새로운 부가가치를 창출하기 위한 응용연구도 진행되고 있다¹⁾.

기존의 유럽식 바람지도 작성법은 현장(in situ) 기상관측자료를 이용하여 수평방향으로는 선형이론모델을 적용하여 보간하고 수직방향으로는 지표면 거칠기를 고려하여 로그 풍속분포식(logarithmic wind-profile equation)으로 외삽(extrapolation)하는 방식인데, 이러한 방식은 지면경사도가 10° 미만이며 최소한 직경 2km 이상의 평지가 확보되는 지형적 조건이 만족되는 경우에만 유효한 방법이며, 측정지점으로부터의 이격거리가 멀어질수록 예측오차는 급증하게 된다. 최근 유럽식 풍력자원 산출법으로 풍력발전단지를

1) Short, W., Blair, N., Heimiller, D., WinDS - Wind Deployment Systems Model, Renewable Energy Modeling Summit, NREL, 2004.

설계, 시공한 중국에서 대부분의 풍력발전단지
의 실제 발전량이 설계값의 60% 수준에 머무르고
있어 그 원인을 복잡지형의 효과를 무시한 단지설계
때문인 것으로 추정하고 있다는 사실은 중국보다
더욱 복잡지형인 우리나라의 풍력발전 사업자에게
시사하는 바가 매우 크다²⁾.

상기 이유로 현재 바람지도 작성의 전반적인 추
세는 기상요소(풍향, 풍속, 기온, 습도 등)에 대한
4차원(3차원 공간 및 시간) 중규모 수치기상모
의로 작성한 지역규모(10km) 바람장으로부터 상세
지형 표현력이 우수한 상세유동모델을 이용하여 통
계적 동적축소화(SDD; Statistical Dynamic
Downscaling)에 의해 미시규모(1km 이하)로 고
해상도화 하는 복합구성으로 귀결되고 있다. 예를
들면, 덴마크는 수치기상모델 KAMM과 선형이론
모델 WASP를³⁾, 호주는 수치기상모델 MM5와 비
선형 난류모델(turbulence model)이 포함된 선
형이론모델 WindScape을⁴⁾, 미국은 수치기상모
델 MASS와 연속방정식에 근간을 둔 유동모델
WindMap을⁵⁾ 조합하여 국가 바람지도를 구축하
였다. 한편 일본 NEDO는 기상부와 공동연구를
통하여 기상모델만으로 공간해상도 500m의 국가
바람지도를 구축하였으며⁶⁾, 노르웨이는 전산유동
해석(Computational Fluid Dynamics; CFD)
모델인 WindSim으로 해안지역만 선별적으로 바
람지도를 작성하였다. 참고로 대부분의 중규모 수

치기상모델은 지배방정식의 수치해석에 도입된 가
정에 의하여 공간해상도의 하한은 1~4km, 시간
해상도의 한계간격은 1~3시간이 된다.

2.3 국내 바람지도 현황

우리나라의 풍력발전보급은 2002년 산업자원부
의 지원정책이 발표된 이후에 활성화되기 시작하였
다. 최초로 작성된 바람지도는 지형을 무시하고 전
국 기상관측소의 측정자료를 단순히 공간보간하여
등치도를 그리는 수준이었다⁷⁾. 그러나 국내 기상
관측소 76개소, 무인관측소 540개소를 모두 포함
시키더라도 관측지점간의 평균 이격거리는 20km
내외로 복잡지형에서의 국지기상현상을 표현한다
는 것은 현실적으로 불가능하다⁸⁾. 경남호 등은⁹⁾
극초단파(scatterometry)를 이용하여 해수면에서
의 풍향, 풍속을 간접적으로 측정한 인공위성 원격
탐사자료(QuikSCAT)를 이용하여 한반도 해상
바람지도를 작성하였으며, 김현구 등은¹⁰⁾ 원격탐
사자료에 NCAR/NCEP 재해석자료를 혼합함으
로써 시간해상도를 풍력자원산정이 가능한 수준으
로 끌어올림과 동시에 육·해상을 망라한 한반도 종
관(synoptic) 바람지도를 작성하였다. 상기 바람
지도의 정확도를 해상부이(marine buoy) 실측풍
속과의 상관분석으로 비교한 표 1에 의하면 재해
석자료를 혼합한 바람지도의 해상풍 예측정확도가
평균적으로 상관계수 30% 정도 향상되었음을 확
인할 수 있다. 참고로 그림 1은 김현구 등의 지형
효과가 배제되는 최하층 표준압력면에서의 연평균

2) Luo, Y., Simulation of Wind Resources in China, GEOS Workshop, 2006.

3) Frank, H.P., Rathmann, O., Motensen, N.G., Landberg, L., The Numerical Wind Atlas - KAMM/WASP Method, Risoe-R-1252(EN), Risoe National Laboratory, 2001.

4) Coppin, P.A., Ayotte, K.A., Steggel, N., Wind Resource Assessment in Australia - A Planners Guide, CSIRO Wind Energy Research Unit, 2003.

5) Elliott, D. and Schwartz, M., Development and Validation of High-Resolution State Wind Resource Maps for the United States, Technical Report NREL/TP-500-38127, NREL, 2005.

6) Japan NEDO, Wind Energy Map and Local Area Wind Energy Prediction System (LAWEPS) Updated, JMA & NEDO, 2005.

7) 김건훈, 이동현, 주영철, 허종철, 변수환, 국내 풍력자원 측정 및 결과 분석, 한국풍력기술 및 정책워크샵, 한국풍력기술연구회, 2003.

8) 이종범, 김재철, 중규모기상모델에 의한 산악지역의 국지기상모의, 한국농림기상학회, 추계학술대회, 2005.

9) 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 한반도 해역의 해상 풍력자원 평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 2, pp. 35-41, 2003.

10) 김현구, 최재우, 정우식, 이화운, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 - I. 원격탐사자료에 의한 종관 바람지도 구축, 한국신재생에너지학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10, 2005.

중관풍속의 분포도이다.

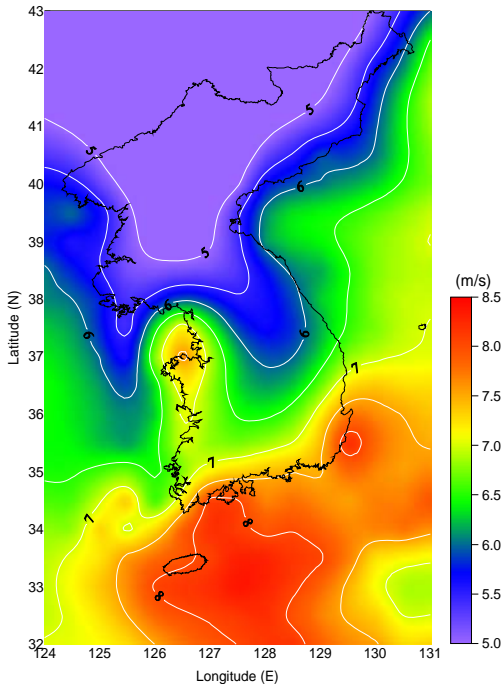


그림 1. 한반도 중관바람지도(김현구 등, 2005)

표 1. 해상부이 관측풍속과의 상관분석

지점	해상부이 평균풍속 (m/s)	경남호 등(2003)		김현구 등(2005)	
		평균풍속 (m/s)	상관계 수	평균풍속 (m/s)	상관계 수
덕적도	5.46	6.28	0.55	6.78	0.68
칠발도	5.00	7.24	0.56	6.45	0.83
거문도	7.11	8.65	0.68	8.09	0.86
거제도	7.64	7.87	0.64	7.48	0.79
동해	6.36	6.97	0.68	6.79	0.85

3. 국가 바람지도 작성

3.1 수치바람모의 방법

현재의 수치바람모의 기술수준을 감안할 때 정책반영을 위한 풍력자원량 산출 시 요구되는 바람 지도의 수평 공간해상도는 1x1km 수준으로, 이는 대부분의 국가 바람지도에서 채택하고 있는 해상도

이기도 하다. 본 연구에서는 궁극적으로 고해상도 바람지도를 작성하기 위하여 1차적으로 광역의 저해상도 바람지도를 작성한 후 고해상도로 상세화 및 세분화하는 등지기법(nesting technique)을 사용함으로써 정확도 향상 및 계산시간 단축의 이득을 얻고자 한다.

수치바람모의에는 PSU/NCAR MM5를 우리나라의 상황에 맞도록 지속적으로 수정한 KMM5를 사용하였으며, 기작성된 중관바람지도를 계산영역의 상층 경계조건으로, 환경부에서 제작한 고해상도 수치지형고도 및 토지이용도를 저해상도로 재가공하여 하층 경계조건으로 적용하여 1단계로 동아시아 영역(3,240 x 3,240km²; 수평 공간해상도 27km)을 수치모의한 후 2단계로 제주도 등 도서를 포함한 한반도 영역(810 x 729km²; 9km)으로 상세화하여 3시간 간격으로 평균적인 기상일 365일에 대해 기상모의함으로써 수평 공간해상도 9km의 저해상도 국가 바람지도를 작성하였다. 이를 위하여 KMM5의 물리과정 중 태양복사과정, 토양층, 식생모델, MRF 대기경계층, Grell 구름, 혼합상 수분, RRTM 장파방사 및 5층 토양층 체계(scheme)를 선택하였다. 참고로 연직방향은 총 33개층으로 구성하되 최하층은 대표적인 풍력발전기 용량별 허브높이에 격자가 위치하도록 조절하였으며 상층경계면은 지형효과가 배제되는 표준압력면 700hPa 이상에 위치시켰다.

3.2 저해상도 바람지도

그림 2는 지표면으로부터 50m 높이에서의 월평균 풍속분포를 도시한 바람지도로 계절별 풍력자원의 변화특성을 잘 보여주고 있다. 즉, 동계에는 탁월한 북서계절풍의 강풍효과에 의해 대부분의 연안과 고산지역에서 풍력발전의 경제성이 보장되는 풍속등급 4 이상의 우수한 풍황을 보이지만 하계의 풍력자원은 다소 빈약하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한 4월에 한시적으로 강풍이 불어오는 기상학적 특성도 잘 나타나 있다.

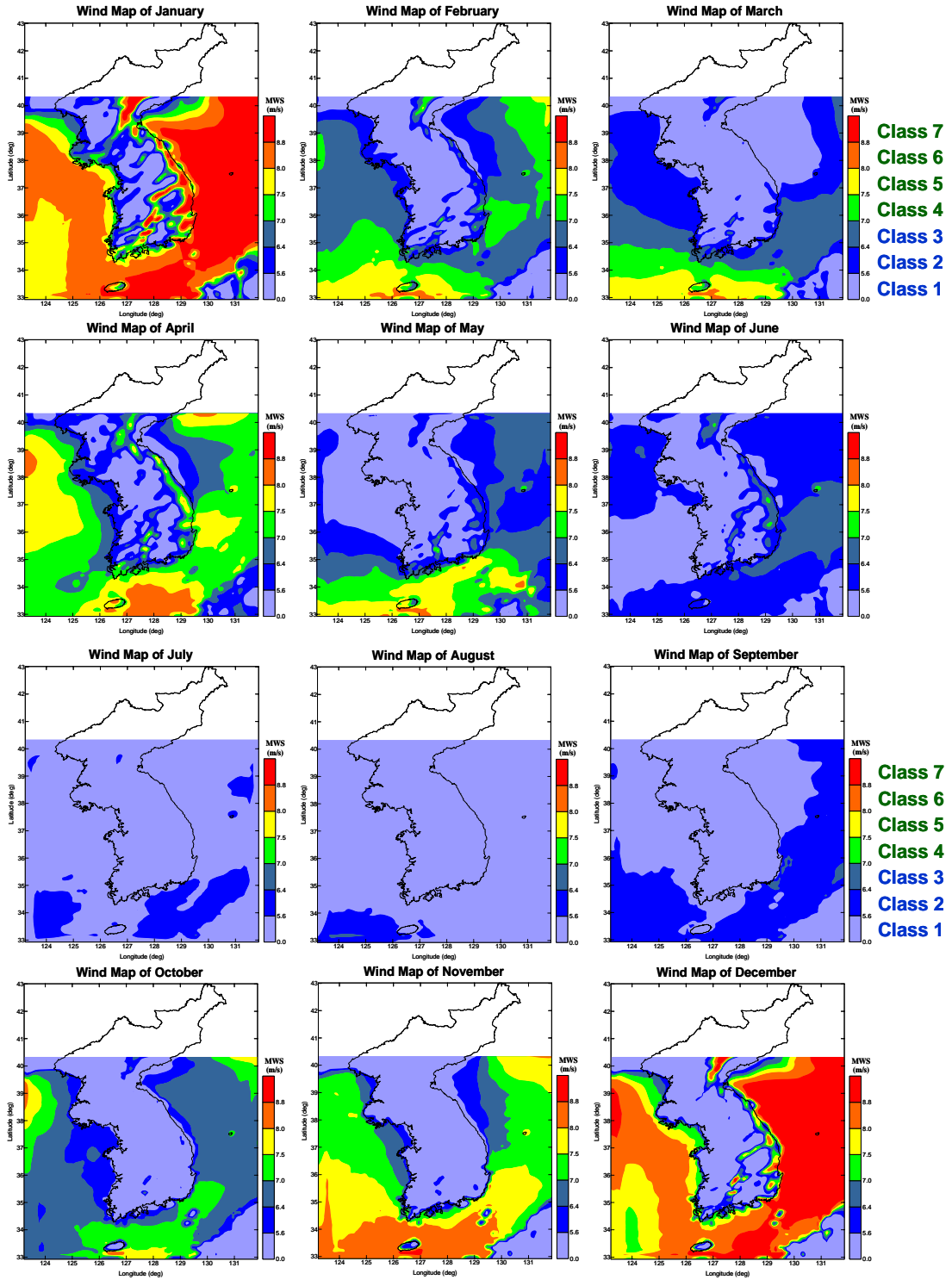


그림 2 : 저해상도 국가 바람지도 - 월평균풍속

저해상도 국가 바람지도로부터 남한 육상에서 연평균풍속의 풍속구간별 면적을 산출하여 보면 표 2와 같다. 참고로 LOCALS는 일본 CTC Co.에서 자체개발한 바람지도 작성모델이며 일본 바람지도 작성 시 한반도를 계산영역에 포함시켜 산출하였고 공간해상도는 본 연구와 유사한 10km이다¹¹⁾.

표 2. 연평균풍속의 구간별 면적

풍속구간 (m/s)	KMM5		LOCALS	
	면적 (km ²)	면적비 (%)	면적 (km ²)	면적비 (%)
~5	53,603	53.9	75,048	75.8
5~6	32,027	32.2	19,095	19.3
6~7	12,630	12.7	4,325	4.4
7~	1,278	1.3	532	0.5
합계	99,538	100	99,000	100

일본에서 작성한 한반도 바람지도와 본 연구에서 작성한 한반도 바람지도를 풍속구간별 면적으로 비교해 보면, 일본의 바람지도가 한반도 남한에서의 풍속을 다소 약하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 수치바람모의의 경계조건으로 사용한 기상자료 및 해석모델에 의한 차이일 것으로 예상되지만 모의결과의 정확도는 실측자료와의 검증은 통해서만 판별할 수 있다. 참고로 저해상도 수치바람모의 결과는 일반적으로 풍속을 실제보다 작게 예측되는 경향이 있는데 이는 지형의 저해상도에 따른 평탄효과에 의해 실제보다 해석상의 지형고도가 낮아지기 때문이다¹²⁾.

참고로 미국 바람지도로부터 산출된 풍속구간별 면적비는 7m/s 이상이 11.7%, 6~7m/s가 35.8%로¹³⁾, 우리나라의 1.3%, 12.7%에 비하여 고풍속

지역의 면적비가 높으므로 풍력자원이 상대적으로 우수하다고 판단된다.

3.3 바람지도의 검증

국가 바람지도의 정확도와 유효성을 검증하기 위하여 지면기상 관측자료와의 기상통계학적 상관분석을 수행하였다. 지표면에서 10 x 10km²의 수평면 격자 평균값으로 정의되는 저해상도 수치모의 결과와 지점(point)에서 정의되는 값인 기상관측 자료의 상호비교를 위하여 저해상도 격자풍속을 고해상도 격자풍속으로 변환하는 과정을 도입하였다¹⁴⁾. 즉, 10x10km² 격자풍속을 1x1km² 격자풍속으로 내삽하되 고해상도 지형고도를 적용하여 지형고도 변화 및 토지이용도 변화에 따른 풍속의 증감을 반영하였으며, 1x1km² 격자풍속으로부터 지점풍속을 산출할 때에는 크리깅(Kriging) 공간보간법을 적용하였다. 참고로 이러한 격자내삽에 의한 고해상도화는 불확도 검증을 위한 임시방편이며 상당한 오차요인이 포함될 수 있음에 주의할 필요가 있다.

그림 3은 고해상도 격자계로 내삽·보정된 국가 바람지도로 육상에서는 백두대간 등 고산지역, 그리고 제주도와 남해안의 평균풍속이 높게 나타나고 있다. 그림 4는 지면기상 관측자료와의 상관분석에 의한 오차분포를 도시한 그래프로, 상관분석에는 육상 기상자료 502지점, 해안 기상자료 27지점, 해상부이 기상자료 5지점 그리고 한국에너지기술연구원의 풍력자원조사 60지점의 지면기상 관측자료의 연평균풍속을 사용하였으며 상기 자료들은 별도로 기상통계학적 장기간보정을 하지는 않았다.

11) Tetsuro, T., Hisashi, F., Ryoichi, T., Yosuke, Y., Asian Wind Power Resource Map, European Wind Energy Conference, 2006.
 12) 이화운, 최현정, 이강일, 성경희, 김현구, 수치모의에 의한 풍력자원 산출 시 상세지형과 지표면 경계조건인 민감도 분석, 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2005.
 13) Elliott, D. and Schwartz, M., Development and Validation

of High-Resolution State Wind Resource Maps for the United States, Technical Report NREL/TP-500-38127, NREL, 2005.
 14) Schaffner, B., Remund, J., Alpine Space Wind Map: Modeling Approach, Alpine Wind Harvest, METEOTEST Report No. 7-2, 2005.

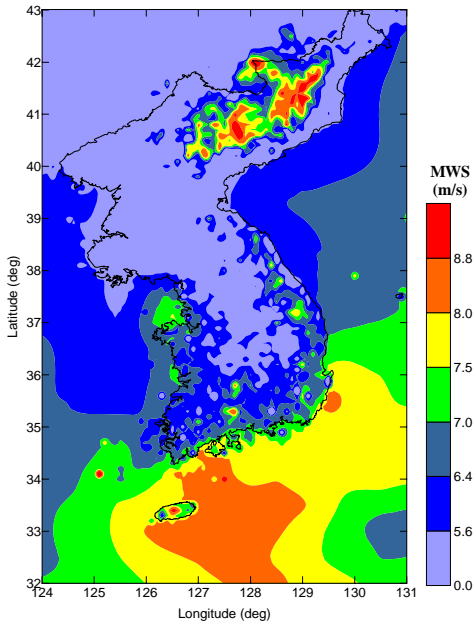


그림 3. 지형내삽에 의한 한반도 바람지도

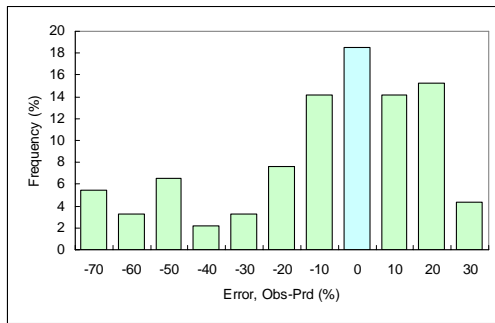
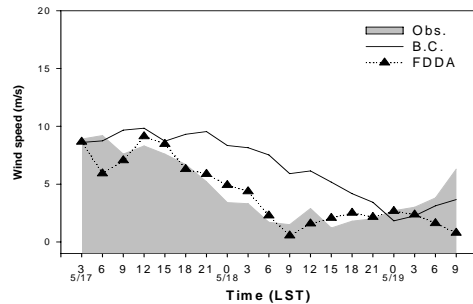


그림 4. 저해상도 바람지도의 오차분석

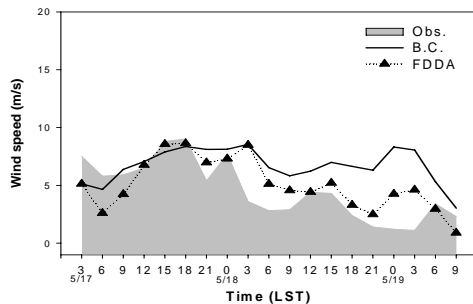
그림 4를 보면 예측풍속의 과대예측에 의한 오차 구간이 넓게 나타나고 있는데, 이러한 오차요인은 기상청 지면기상 관측자료의 한계점 때문인 것으로 분석된다. 즉, 대부분의 기상관측소가 지역표고 대표성이 현저히 떨어지기는 저풍속 지점에 위치하기 때문으로 사료되며, 이에 바람지도 검증용으로 부적합한 것으로 판단하여 상관분석에서 제외하였다. 결과적으로 연안정지 및 해상부이 관측자료, 한국 에너지기술연구소의 풍력자원조사 실측풍속과 고해

상도 격자내삽 예측풍속은 상관계수 0.76, 결정계수(R²) 0.76의 우수한 적합도를 보이는 것으로 분석되었다. 기상관측소와는 달리 이들 관측지점은 해상, 해안 또는 풍력자원조사 위치선정기준에 의해 지역표고 대표지점에서 관측되었기 때문인 것으로 판단된다. 한가지 주의할 사항은 본 상관분석 결과에는 고해상도 내삽과정에서의 오차 및 장기간보정을 하지 않은 실측자료에 의한 오차 등 여러가지 불확도 요인이 포함되어 있다는 것이다.

그림 5는 수치바람모의의 민감도 분석을 위하여 해상부이 실측풍속(영역)과 CDAS(Climat Data Assimilation System) 자료만을 경계조건으로 기상모의한 예측풍속(실선) 그리고 그림 1의 종관 바람지도를 자료동화(FDDA)하여 기상모의한 예측풍속(삼각형)의 시계열 비교를 보여주는 그래프이다. 종관 바람지도의 자료동화에 의하여 전반적인 해상 풍속 과대예측 경향이 개선되었으며 실측풍속의 변화양상을 IOA(Index of Agreement) 0.8 수준으로 정확하게 추종함을 확인할 수 있다.



(a) 거제도 해상부이 지점



(b) 칠발도 해상부이 지점

그림 5. 해상부이 시계열 관측풍속과의 상관분석

4. 결론

중관바람지도의 경계조건 자료동화 및 수치바람 모의에 의하여 저해상도 국가 바람지도를 작성하였으며, 고해상도 지형자료를 이용하여 보정한 예측 풍속과 지역표고 대표성이 있는 지면기상 측정풍속과의 상관분석을 통하여 작성된 국가 바람지도가 정성적, 정량적으로 유효함을 확인하였다. 반면 일본의 예측결과는 한반도 평균풍속을 낮게 예측하는 것으로 사료된다. 또한 작성된 저해상도 바람지도로부터 우리나라 풍력자원 잠재량을 확인할 수 있으나 저해상도 바람지도로 풍력자원량을 산출하기에는 많은 오차요인이 포함되므로, 향후 고해상도 바람지도가 작성하면 보급정책반영 및 국내시장예측이 가능한 정량지표로서의 풍력자원량 산출이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제명: 신재생에너지 자원조사 종합관리 시스템 구축사업, 과제번호: 2004-N-NC02-P-01-0-000).

참 고 문 헌

1. 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 한반도 해역의 해상 풍력자원 평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 2, pp. 35-41, 2003.
2. 김건훈, 이동현, 주영철, 허종철, 변수환, 국내 풍력자원 측정 및 결과 분석, 한국풍력기술 및 정책워크샵, 한국풍력기술연구회, 2003.
3. 김현구, 최재우, 정우식, 이화운, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 - I. 원격탐사자료에 의한 중관 바람지도 구축, 한국신재생에너지학회지,

Vol. 1, No. 1, pp. 1-10, 2005.

4. 이종범, 김재철, 중규모기상모델에 의한 산악지역의 국지기상모의, 한국농림기상학회, 추계학술대회, 2005.
5. 이화운, 최현정, 이강열, 성경희, 김현구, 수치모의에 의한 풍력자원 산출 시 상세지형과 지표면 경계조건에 대한 민감도 분석, 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2005.
6. Coppin, P. A., Ayotte, K. A., Steggel, N., Wind Resource Assessment in Australia - A Planners Guide, CSIRO Wind Energy Research Unit, 2003.
7. Elliott, D. and Schwartz, M., Development and Validation of High-Resolution State Wind Resource Maps for the United States, Technical Report NREL/IP-500-38127, NREL, 2005.
8. Frank, HP., Rathmann, O., Motensen, NG., Landberg, L., The Numerical Wind Atlas - KAMM/WASP Method, Risoe-R-1252(EN), Risoe National Laboratory, 2001.
9. Japan NEDO, Wind Energy Map and Local Area Wind Energy Prediction System (LAWEPS) Updated, JMA & NEDO, 2005.
10. Luo, Y., Simulation of Wind Resources in China, GEOS Workshop, 2006.
11. Schaffner, B., Remund, J., Alpine Space Wind Map: Modeling Approach, Alpine Wind Harvest, METEOTEST Report No. 7-2, 2005.
12. Short, W., Blair, N., Heimiller, D., WinDS - Wind Deployment Systems Model, Renewable Energy Modeling Summit, NREL, 2004.
13. Tetsuro, T., Hisashi, F., Ryoichi, T., Yosuke, Y., Asian Wind Power Resource Map, European Wind Energy Conference, 2006.