

한반도 바람지도 구축에 관한 연구 (II. 저해상도 바람지도화 및 풍력자원 정보체계)

김현구*, 장문석

Study on Establishment of Wind Map of the Korean Peninsula (II. Low-Resolution Wind Mapping and Wind Resource Information System)

Hyun-Goo Kim, Moon-Seok Jang

Abstract A low-resolution national wind map, which is a prerequisite for setting up the national dissemination target and strategy of wind energy development, has been established by numerical wind simulation using the synoptic wind map, developed at the first stage, as an upper boundary condition. Based on the wind map, Wind Resource Information System has been composed in order to support scientific and systematic wind resource assessment and analysis.

Key words Low-Resolution Wind Mapping(저해상도 바람지도화), Numerical Wind Simulation(수치바람모의), Wind Resource Potential(풍력자원 잠재량), Wind Resource Information System(WRIS: 풍력자원 정보체계)

* 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단
 ■E-mail: hyungoo@kier.re.kr ■ TEL: (042)860-3376 ■ FAX: (042)860-3543

1. 서론

1.1 풍력자원 개발을 위한 국가정책

풍력을 포함한 재생에너지의 국가적인 개발목표 설정 및 지원정책 수립의 바람직한 순서는 다음과 같아야 할 것이다.

○풍력자원 개발여부의 결정

풍력자원 잠재량을 확인하여 풍력자원 개발의 타당성을 확인한 후 개발·보급 여부를 결정한다. 현재 풍력자원 잠재량을 확인하는 가장 과학적인방법은 바람지도(wind map)로부터 산출하는 것이다.

○풍력자원 보급목표의 설정

풍력자원 잠재량이 풍부하여 풍력자원 개발을 결정하였다면 그 다음 단계는 보급목표를 설정하는 것이다. 현 수준의 풍력발전 기술력과 풍력자원 개발한계를 고려하여 현실적으로 달성 가능한 보급목표가 제시되어야 한다. 따라서 바람지도와 지리정보체계(GIS; Geographical Information System)를 이용한 신뢰성 있는 풍력자원 이용가능량 산출이 요구되며 바람지도의 해상도와 산출결과의 정확도가 비례하게 된다.

○풍력발전 개발·보급 실행계획 수립

연차별 보급목표를 수립하였다면 보급목표 달성을 위한 중장기 기술개발전략 및 보급지원정책을 수립하여야 한다. 특히 우

리나라는 풍력발전 보급과 동시에 산업기술개발을 추진하고 있기 때문에 개발된 국산화 풍력발전기의 안정적 수요처 확보를 위해 지속적인 풍력발전 대상지 발굴이 요구된다. 유럽풍력협회(EWEA; Europe Wind Energy Association)에서 발간한 풍력분야 연구개발 우선순위 보고서에 따르면¹⁾, 복잡지형을 고려한 바람지도 작성에 의한 풍력자원탐사는 4대 핵심 연구분야의 하나로, 지속적으로 큰 비중을 차지할 것으로 예측하고 있다.

1.2 활용주체별 바람지도의 효용성

바람지도는 풍력자원 정책개발에 있어서 중추적인 역할을 담당할 뿐 아니라, 풍력분야의 모든 활용주체에게 매우 중요한 핵심정보를 제공하여 준다.

○정책수립자에게는 보급목표 설정 및 지원정책 수립의 정량적이며 논리적인 근거자료를 제공하여 준다. 즉, 과학적인 방법으로 작성된 바람지도로부터 산출된 풍력자원 잠재량은 보급목표 설정 및 지원정책 수립의 당위성과 합리성을 입증하여 준다.

○발전사업자에게는 우수한 개발대상지 발굴을 위한 풍력자원의 공간분포 정보를 제공하여 준다. 풍력발전 사업자는 바람지도를 참조하여 유망후보지를 선정하고 현장측정에 앞서 사

업타당성을 평가함으로써 사업위험성의 경감 및 평가비용의 절감효과가 있다. 참고로 미국, 프랑스, 일본 등은 고해상도 바람지도를 이용하여 실측조사를 계획하고 사전평가하는 개발방식을 채택하고 있다.

○유관연구자, 즉 대기환경 분야의 대기확산영향평가, 방재대책 분야의 산불확산예측, 건축설계 분야의 풍하중(wind load) 산정 등 다양한 이공학 분야의 연구자에게 바람지도는 중요한 기술자료를 제공할 뿐 아니라 다양한 응용이 가능하므로 타분야 파급효과가 매우 크다.

○일반국민으로 하여금 재생에너지 개발에 대한 긍정적인 비전을 공유하도록 유도하기 위해서는 우선적으로 풍력자원에 대한 과학적인 정보제공이 필요하다. 바람지도는 이러한 목적에 가장 잘 부합되는 과학적이며 객관적인 자료이다.

1.3 해외 바람지도화 추세

대부분의 풍력이용 국가에서 바람지도의 고해상도화를 통한 풍력자원 발굴을 추진하고 있다. 특히 지리정보체계 등과 연계한 정보화로 부가가치의 창출 및 신정보 생산을 위한 응용연구도 다수 진행되고 있다. 세계적인 활용추세를 살펴보면, 미국은 육상에 이어 고해상도 해상 바람지도를 제작하고 있으며,

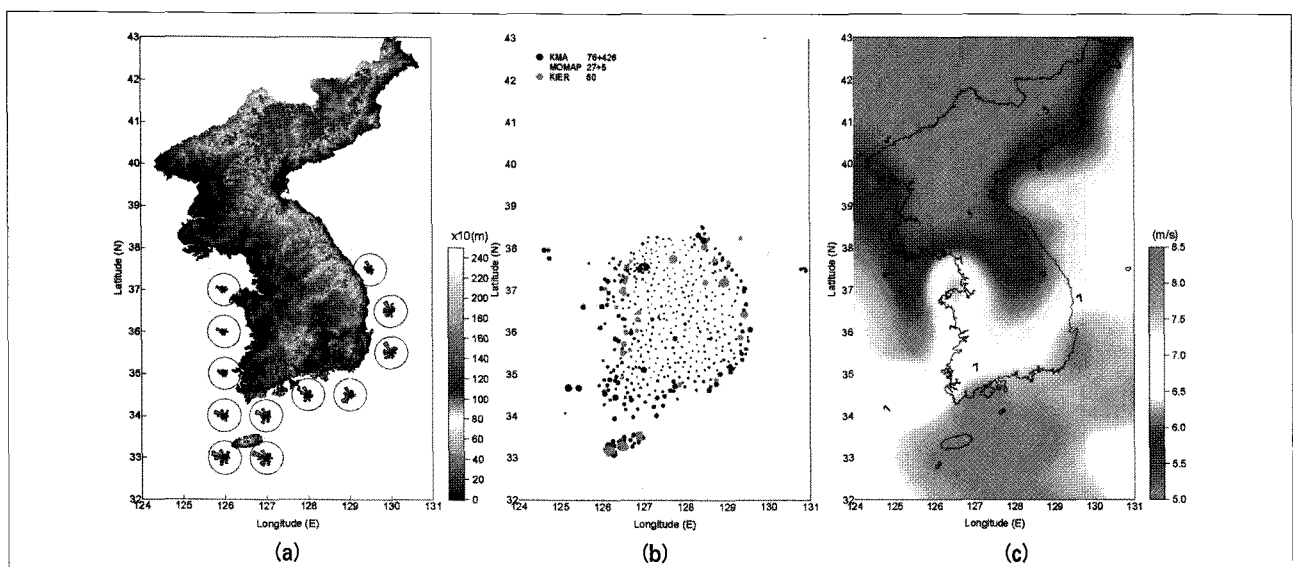


Fig. 1. Input and validation data for the wind mapping
(a) numerical elevation map (b) in-situ measurement map (c) synoptic wind map

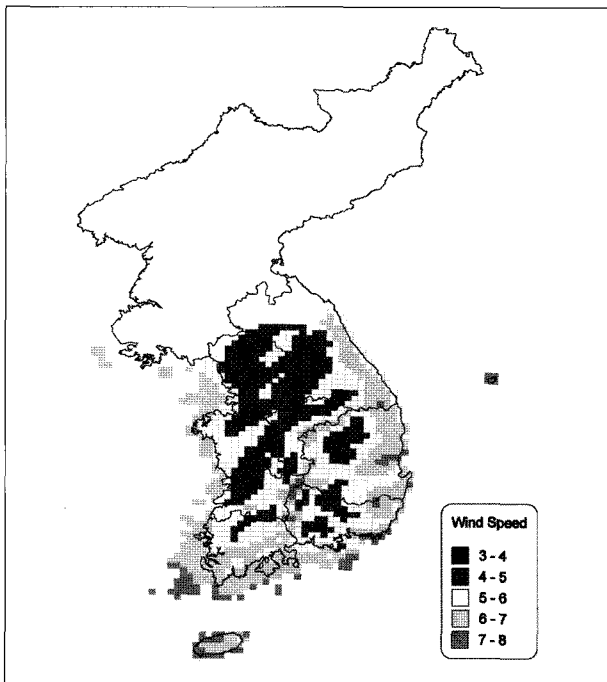


Fig. 2. Wind map of annual mean wind speed

풍력자원 수용을 고려한 전력계통망 재설계를 위한 WinDS (Wind Deployment System)를 개발하고 있다²⁾. 영국은 지리 정보체계와 연계한 육상/해상 풍력자원 잠재량 산출 및 전력공급 예측연구를 완료하였고³⁾, 미국, 일본 및 캐나다⁴⁾ 등은 수치 기상모의에 의한 바람지도 구축 솔루션을 개발하여 중국 등 외국에 수출하고 있다. 한편 우리나라의 풍력자원조사 역사 및 현황은 후발주자인 관계로 상대적으로 열등한 수준이다⁵⁾.

1.4 연구목적 및 연구개요

본 논문에서는 한반도 바람지도 구축에 관한 1단계 연구결과인⁶⁾ 종관(synoptic) 바람지도를 경계조건으로 입력하여 2단계로 수치바람모의에 의해 작성한 저해상도 국가 바람지도와 이를 토대로 구축된 풍력자원 정보체계(WRIS; Wind Resource Information System)에 대하여 소개하고자 한다.

2. 저해상도 바람지도화

풍력발전 단지개발 적합성평가 및 풍력자원 이용가능량 산출에 요구되는 바람지도의 공간해상도는 $1 \times 1\text{km}^2$ 수준으로,

이는 대부분의 국가 바람지도에서 채택하고 있는 해상도이다.

본 연구에서는 고해상도 국가 바람지도 구축의 2단계로, 동지기법(nesting technique)을 사용한 수치바람모의에 의해 공간해상도 $10 \times 10\text{km}^2$ 의 저해상도 바람지도를 구축하였다. 이때 1단계에서⁶⁾ 원격탐사자료(remote-sensing data)의 자료동화(data assimilation)로 구축한 종관 바람지도를 상층경계조건으로 부과하였다. 향후 3단계에서는 2단계에서 구축된 저해상도 바람지도를 입력자료로 활용하여 $1 \times 1\text{km}^2$ 까지 공간해상도를 향상시킬 예정이다. 참고로 고해상도화에 앞서 저해상도 바람지도를 작성한 이유는, 현재 진행되고 있는 국가적인 풍력자원 개발사업의 타당성을 입증할 수 있는 과학적인 근거를 조기에 제공함과 아울러 제반 전략을 재평가하기 위해서이다. 그렇지만 궁극적으로는 고해상도 바람지도가 구축되어야 사업단계까지 실질적인 활용영역이 확대될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 1은 수치바람모의 입력자료로 사용된 수치고도지도(numerical elevation map), 종관 바람지도 그리고 구축된 저해상도 바람지도의 검증에 사용된 지면 실측자료(기상청 기상관측소 및 무인관측소, 해수부 연안정지 및 해상부이, 한국에너지기술연구원 풍력자원조사)의 평균풍속을 공간분포도로 도시한 것이다. 한편 작성된 저해상도 바람지도의 기상통계학적 검증은 김현구 등(2006)을 참고하기 바란다⁷⁾.

Fig. 2는 수치바람모의에 의해 구축된 저해상도 바람지도를 계산격자 형태로 도시한 그림으로 지표면 50m 높이에서의 연평균풍속 분포를 보여주고 있다. 백두대간 및 지리산, 금정산 등 고산지대, 남해안 도시지역 및 연안, 제주도 일대 그리고 서해 일부 해상에서의 연평균풍속이 6m/s 이상으로 고풍속임을 알 수 있다. 참고로 풍력자원을 평가함에 있어서 연평균풍속은 풍력과 비례관계가 아닌 경우가 많으므로 정성지표로 보아야 하며 정량적인 판단은 풍력밀도(wind power density)로 하여야 함에 유의할 필요가 있다.

3. 풍력자원 정보체계화

3.1 풍력자원 정보체계 개요

풍력자원 정보체계란 수치바람모의에 의해 작성된 바람지도의 효율적인 활용을 위하여 지리정보체계 등과 연계하거나 풍력발전사업에 필요한 정보로 재가공된 정책 및 사업분야 지원

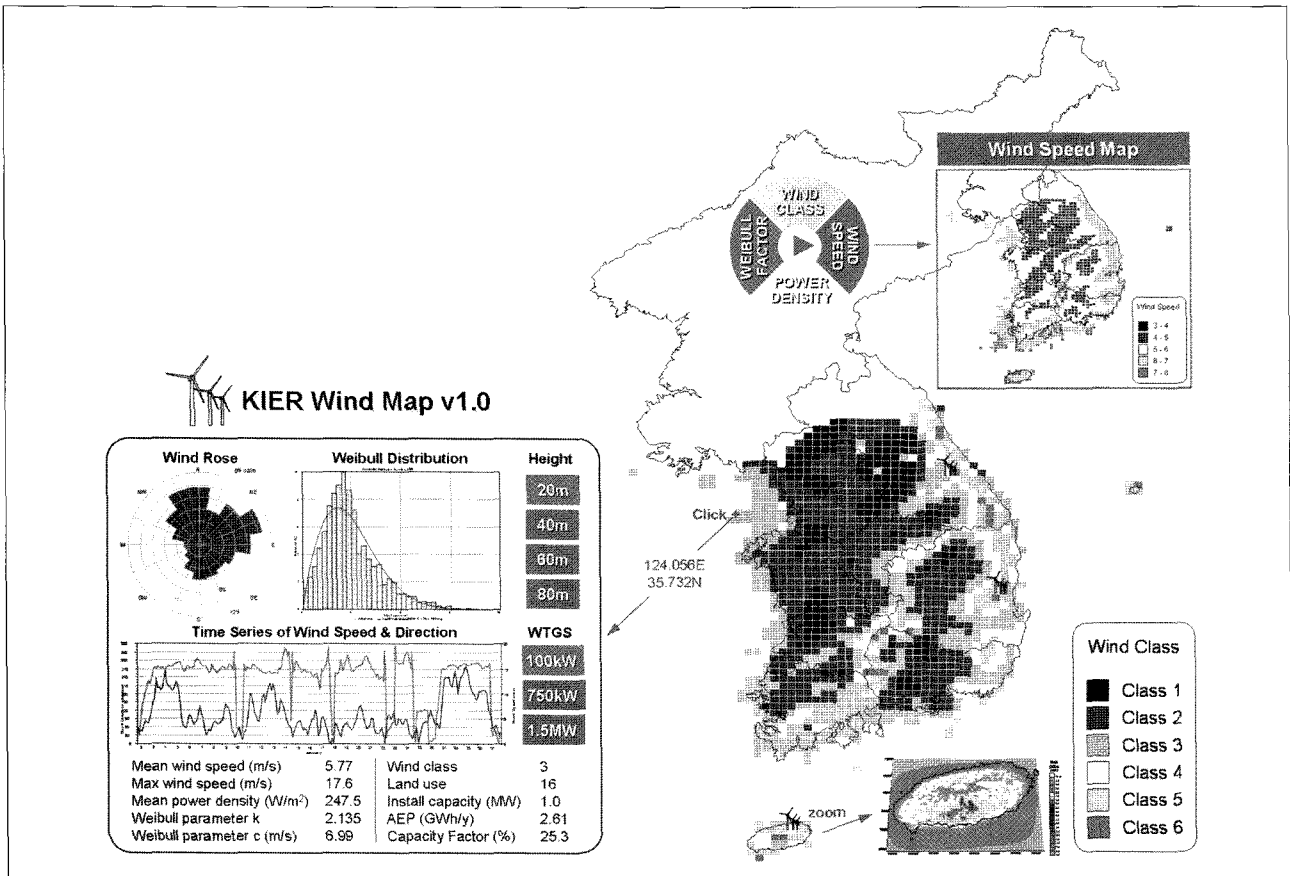


Fig. 3. Wind Resource Information System, KIER-WindMap v1.0

도구이다. Fig. 3은 저해상도 바람지도를 기반으로 구성된 풍력자원 정보체계의 사용례를 보여주는 것으로, 한국에너지기술연구원에서 개발한 풍력자원 정보체계 KIER WindMap v1.0은 다음과 같은 구성을 갖는다.

○ 격자화된 공간분포도

수치바람모의 결과 중 연평균풍속 분포도, 바람등급(wind class) 분포도, 풍력밀도 분포도 등의 풍력자원 통계정보를 10×10km²의 계산격자 형태로 표출되도록 구성하였다. 향후 고해상도 바람지도가 구축되면 이러한 격자정보는 현재의 저해상도에서 고해상도 영역까지 점진적인 화면확대를 통하여 보다 정밀한 정보형태로 제공될 수 있을 것이다.

○ 격자별 풍력자원 통계정보

수치바람모의는 유한차분법에 의해 구성된 격자계 상에서 수행되었기 때문에 격자에서 정의되는 기상요소는 격자전체에

대한 평균값이다. 풍력자원 정보체계에서 특정 격자를 선택하였을 때 해당 격자영역에서의 풍력자원 통계분석 결과가 별도의 화면으로 표출되도록 구성하였다. 즉, 해당격자의 위경도 좌표와 바람장미(wind rose), 풍속의 와이블(Weibull) 분포도, 풍향·풍속의 시계열(time-series) 그래프 그리고 연평균풍속, 최대풍속, 와이블 계수, 풍력밀도 등 풍력자원평가에 필요한 정량지표를 제시하게 된다. 또한 풍력발전기 허브높이(hub height)에서의 풍력자원 통계정보로 변환하여 볼 수 있으며 풍력발전기 기종과 설치대수를 지정하면 그에 따른 연간에너지 생산량(AEP; Annual Energy Production)의 개략적인 추산 결과를 확인할 수 있다.

○ 고해상도 바람지도 연계

현재는 저해상도 바람지도를 격자정보화된 공간분포도 형태로 제공하고 있으나 향후 고해상도 바람지도가 개발되면 본 풍력자원 정보체계와 연계될 예정이다. 즉 Fig. 3의 우측하단에

도시된 바와 같이 저해상도 바람지도의 특정지점을 선택하면 해당 격자를 중심으로 한 영역에 대한 고해상도 바람지도를 조회할 수 있으며 본 경우에는 제주도 고해상도 바람지도가 그 실례이다.

3.2 격자별 풍력자원 분석정보

격자별 풍력자원 분석정보는 다음과 같은 통계분석 및 계산 과정에 의하여 산출되었다. 즉,

○평균풍력밀도(mean wind power density)

저해상도 수치바람모의는 3시간 간격으로 1년간에 대하여 수행되었으므로 획득된 기상요소의 시계열 샘플수는 $N=8 \times 365=2,920$ 이 된다. 따라서 평균풍력밀도의 계산식은 다음과 같다.

$$MWPDP[W/m^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left(\frac{1}{2} \rho V_i^3 \right)$$

○와이블 계수(Weibull parameter)

와이블 계수는 2,920개 시계열 풍속의 풍속구간별 발생빈도에 대한 통계분석으로 산출하였으며 12방위 풍향구간에 대해서도 등급계수(scale factor)와 형상계수(shape factor)를 산출하였다.

○바람등급(wind class)

바람등급은 덴마크 및 미국 풍력산업협회 등에서 국제표준으로 사용하는 기준을 적용하되 지면고도 50m에서 산출된 연평균 풍력밀도를 기준으로 구분하였으며 이하 다른 고도에서도 바람등급은 동일한 것으로 간주하였다. 참고로 바람등급이 4등급 이상이면 풍력발전 사업경제성이 유력하며 3등급의 경우에도 제반 여건에 따라 단지개발에 의한 경제성이 확보될 수 있는 것으로 평가된다.

○연간에너지생산량(AEP)

본 정보체계에서 연간에너지생산량을 추산하기 위하여 다음과 같은 시나리오를 적용하였다. 즉, 격자 내에 설치 가능한 풍력발전기는 현재 국산화 개발 중인 육상용 풍력발전기인 100kW, 750kW 그리고 1.5MW 풍력발전기로 한정하였으며 각각의 허브높이는 30m, 50m 그리고 80m로 일률적으로 적

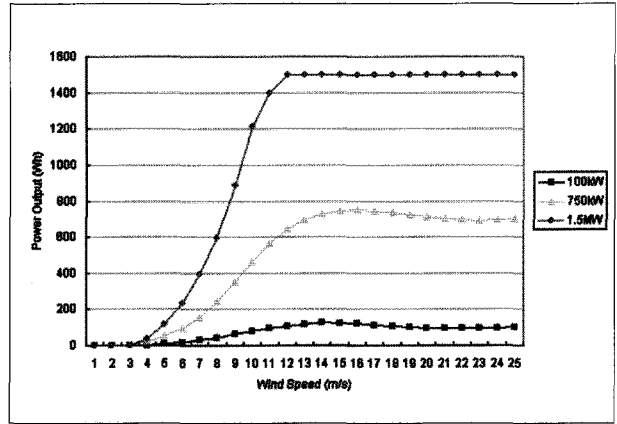


Fig. 4. Power curves of the wind turbines adopted in Kier WindMap v1.0

용하였다. 설치된 풍력발전기 간의 후류손실(wake loss), 기기 효율, 배전손실 등 일체의 손실요인을 배제하고 Fig. 4의 풍력발전기 기종별 성능곡선(power curve)을 적용하여 이론적 에너지생산량을 산출하였다. 즉, Fig. 3의 풍속구간별 발생빈도에 Fig. 4의 풍속별 출력값 및 가동시간 8,760을 곱하고 전 풍속구간에 대해 합산하여 연간에너지생산량을 계산한다.

○용량계수(capacity factor)

용량계수는 바람에너지가 전력으로 전환되는 실제효율을 나타내는 지표값으로, 실질 연간에너지생산량과 이론적 연간에너지생산량의 비율로 정의된다. 따라서 용량계수는 풍력발전기가 정격출력으로 가동되는 시간비율을 나타내는 지역별 풍력자원 특성값이다.

$$CF = \frac{Actual\ AEP\ [MW]}{365 \times 24 \times WTGS\ Capacity\ [MW]}$$

본 풍력자원 정보체계에서 용량계수를 산정함에 있어서는 이론적 연간에너지생산량에 손실계수를 0.85로 적용하여 실질 연간에너지생산량을 추산하였다. 이때의 손실계수에는 후류손실, 기계적/전기적 손실 및 유지보수에 의한 손실인 가동률(availability)이 모두 포함된다.

3.3 풍력자원 정보체계의 활용

○풍력발전 대상지 검토

저해상도 국가 바람지도를 토대로 풍력발전 유망후보지를

검토하여 보면, 백두대간을 따라 우수한 풍력자원이 분포하고 있는데 그 중 대관령과 영덕에는 이미 상용기간 풍력단지가 들어서 있다. 그 외에 고산지역의 풍력자원이 우수한 것으로 나타났으나 많은 경우에 국립공원으로 지정되어 있어 개발이 제한적이다. 해안에서는 남서해안과 남해안 일대의 풍력자원이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 이미 선행연구에서⁹⁾ 분석되었듯이 본 연구의 저해상도 바람지도에서도 서해안 일대는 풍력자원 3등급 수준으로 그다지 우수하지 않음을 확인할 수 있다. 참고로 Fig. 2의 연평균풍속 분포도에서는 서해안 일대도 비교적 풍속이 우수하였으나 실질적인 지표인 풍력밀도로 판별하여야 함을 지적한 바 있다. 한편 저해상도 지형을 적용함에 따라 고산지역이 평탄화되는 효과가 있기 때문에 풍력자원은 상대적으로 평가절하되는 경향이 있다.

○풍력자원 잠재량 산정

저해상도 국가 바람지도에 기초하여 남한 풍력자원 잠재량을 산출한 바에 의하면 육상 풍력자원은 7.8GW로 원자력발전소 8기에 해당하는 상당한 잠재량을 가지고 있는 것으로 추산되었다. 따라서 우리나라도 풍력자원을 개발할 만한 충분한 자원량을 가지고 있음을 과학적인 근거자료로부터 판단할 수 있다. 산출방법을 요약한 Table 1을 보면, 각각의 풍속구간별 면적을 산출하고, 개발가능성을 가정하여 풍력자원 잠재량을 산출하였으며, 이 산출결과는 신재생에너지백서에서 제시한 자원량과도 유사하다⁹⁾.

그러나 7.8GW라는 잠재량은 이론적인 수치이며 실제 개발 가능한 이용가능량은 현재의 저해상도 바람지도 만으로 산출하기에는 무리가 따른다. 따라서 향후 고해상도 바람지도가 구축된 이후에 지리정보시스템과 연계하여 개발 부적합지를 배제하는 방식으로 개발가능 면적을 산정하고 현상태의 기술수준을 적용하여 이용가능량을 산정하여야 할 것이다.

Table 1. Estimation of inland wind energy potential

풍속구간 (m/s)	구간별 면적		개발 가능성 (%)	추산 잠재량 (GW)
	면적 (km ²)	면적비 (%)		
~5	53,603	53.9	0.5	2.8
5~6	32,027	32.2	1.0	3.4
6~7	12,630	12.7	1.5	1.3
7~	1,278	1.3	2.0	0.3
합 계	99,538	100	-	7.8

○풍력분야 연구·개발의 기초자료

본 연구에 의해 구축된 2단계 저해상도 바람지도는 향후 3단계 고해상도 바람지도 작성을 위한 수치바람모의의 입력자료로 사용될 것이다. 고해상도 바람지도는 정책분야 및 사업분야에서 실질적인 활용이 기대되는 만큼 수치바람모의와 더불어 지면측정과 기상통계학적 비교분석을 실시하여 정확도를 검증함과 동시에 오차분석에 의한 불확도(uncertainty)가 제시되어야 할 것이다.

현재 저해상도 바람지도를 기초자료로 이용하여 풍력발전에 분야 활용을 위한 한반도 풍계분류 등의 응용연구가 진행중으로, 본 연구결과는 풍력자원평가 분야의 기술개발에 상당한 파급효과가 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

한반도 바람지도 구축 연구의 2단계로 수치바람모의에 의하여 공간해상도 10×10km², 시간해상도 3시간 간격의 저해상도 국가 바람지도를 구축하였다. 작성된 저해상도 국가 바람지도는 현재 국산화 개발이 진행 중인 100kW, 750kW 및 1.5MW 육상용 풍력발전기로 구성된 풍력발전 단지개발의 사전검토를 위한 개략적인 평가자료를 제공할 수 있도록 풍력자원 정보체계를 개발하였다. 그러나 풍력발전 보급목표 설정 및 기술개발 정책수립을 위한 정량적인 지표를 도출하고 풍력사업자가 유망후보지 발굴 및 사전평가에 활용하기 위해서는 궁극적으로 고해상도 바람지도가 개발되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발 사업인 신재생에너지 자원조사 종합관리시스템 구축(2004-N-NC02-P-01-0-000) 및 한반도 해역의 고해상도 풍력자원지도 구축 및 단지개발 적합성 평가시스템 개발(2006-N-WD12-P-03-0-000)에 의해 수행되었습니다.

풍력자원 정보체계 KIER WindMap v1.0은 저해상도 바람지도에 대한 기상통계학적 검증 및 불확도 분석을 완료한 후 웹 서비스할 예정입니다.

References

- (1) EWEA, 2005, Prioritising Wind Energy Research- Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector, European Wind Energy Association.
- (2) Short, W., Blair, N., Denholm, P., Heimiller, D., 2006, "Modeling the Penetration of Wind Energy Into the U.S. Electric Market," CNLS 26th Annual Conference.
- (3) Institute of Energy System, 2006, Matching Renewable Electricity Generation with Demand, The University of Edinburgh, Research Report Contract QLC 11/1.
- (4) Yu, W., Benoit, R., Girard, C., Glazer, A., Lemarquis, D., Salmon, J. R., Pinard, J. P., 2006, "Wind Energy Simulation Toolkit(WEST): A Wind Mapping System for Use by the Wind Energy Industry," Wind Engineering, Vol.30, No.1, pp.15-33.
- (5) 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 최현정, 김동혁, 2006, "수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축", 한국태양에너지학회 논문집, Vol.26, No.4, pp.31-38.
- (6) 김현구, 최재우, 이화운, 정우식, 2005, "한반도 바람지도 구축에 관한 연구 - I. 원격탐사자료에 의한 종관 바람지도 구축", 한국신재생에너지학회지, Vol.1, No.1, pp.1-8.
- (7) 김현구, 이영섭, 이화운, 김동혁, 윤창열, 2007, "한반도 바람지도 구축에 관한 연구 - II. 저해상도 바람지도의 기상통계학적 검증", 한국대기환경학회지, 심사중.
- (8) 산업자원부, 2006, 2005년 신재생에너지 백서, 신재생에너지센터.

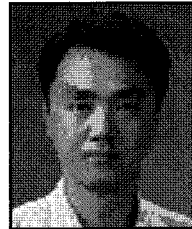
김현구



1989년 인하대학교 항공공학과 공학사
 1991년 포항공과대학교 기계공학과 공학석사
 1997년 포항공과대학교 기계공학과 공학박사
 1998년 미국 아이오와대학교 IHR 연구원
 2000년 포항산업과학연구원 책임연구원

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단
 (E-mail : hyungoo@kier.re.kr)

장문석



1984년 한양대학교 기계공학과 공학사
 1987년 한양대학교 기계공학과 공학석사
 1994년 한양대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단장
 (E-mail : msjang@kier.re.kr)