

## 수치바람모의에 의한 한반도 바람지도 구축

김현구\* · 장문석\* · 이화운\*\* · 최현정\*\*

### Establishment of Korean Wind Map by Numerical Wind Simulation

Hyun-Goo Kim\*, Moon-Seok Jang\*, Hwa-Woon Lee\*\* and Hyun-Jeong Choi\*\*

**Keywords :** Wind Map(바람지도), Wind Resource(풍력자원), Numerical Wind Simulation(수치바람모의)

#### Abstract

In this paper, the research background and objectives of the wind mapping project of the Korean Peninsula, which has been carrying out as a part of "Investigation of new-renewable energy resources and establishment of comprehensive management system" funded by Korea Ministry of Commerce, Industry and Energy, are introduced together with the intermediate result of the project so far. The Korean wind map is to be established by numerical wind simulation based on terrain model ME-DEM and land-use model ME-LUM with the spatial resolution of 10km.

#### 1. 서론

본 논문에서는 한국에너지기술연구원에서 수행 중에 있는 「신재생에너지 자원조사 종합관리시스템 구축사업(산업자원부)」 중 수치바람모의(numerical wind simulation)에 의한 한반도 바람지도 구축 연구의 연구배경과 연구목적, 그리고 현재까지의 연구성과 및 향후 계획에 대하여 소개하고자 한다.

#### 2. 풍력발전과 바람지도

##### 2.1 풍력자원지도의 구분

풍력자원지도라 함은 풍력자원(wind resource)에 대한 제반 정보를 지리공간 상에 투영한 그림을 말한다. 풍력자원지도 중 기상학적 요소인 바람에 한정하여 바람지도(wind map)라고 하며 공간해상도에 따라 다음과 같이 세 가지로 분류할 수 있다(Landberg et al., 2003).

##### (1) Wind Atlas

종관규모(synoptic scale) 즉, 공간해상도 10~100km의 광역규모 분포지도로 국가 또는 대륙의 풍력자원 잠재량에 대한 개략적인 추산이 가능하다.

##### (2) Wind Map

중규모(mesoscale) 즉, 공간해상도 1~10km의 지역규모 분포지도로 풍력자원 개발가능량의 정량산출 정보와 함께 풍력발전 단지개발을 위한 상세조사 후보지를 판별할 수 있는 수준의 정보를 제공하여 준다.

##### (3) Micro-Siting Map

미시규모(microscale) 즉, 공간해상도 10m~1km의 국소규모

분포지도로 풍력발전사업 타당성 평가 및 풍력발전 단지설계를 위한 직접적인 정보를 제공하여 준다. 참고로 유럽과 미국 등 풍력발전이 상업화된 국가에서 미시규모 바람지도는 풍력발전사업의 영역에 포함되지만 우리나라에서는 풍력발전 보급활성화를 위하여 현재까지는 한국에너지기술연구원에서 풍력자원 측정조사 및 풍력발전 단지설계를 담당하여 왔다.

풍력발전에 있어서 바람지도는 모든 활용주체에게 매우 중요한 정보를 제공하여 준다. 즉, 정책/보급 관계자에게는 풍력발전 보급가능량을 정량적으로 파악하여 정책수립 또는 보급추진을 위한 근거를 제공하여 주며, 풍력발전사업자에게는 유망후보지 발굴 및 상세조사를 위한 설계자료를, 일반국민에게는 풍력발전에 대한 과학적인 정보를 제공하여 재생에너지에 대한 긍정적 비전을 공유하도록 한다. 연구자에게는 국지풍계 해석을 위한 기초자료를 제공함으로써 비단 풍력분야만이 아니라 대기환경, 건축설계, 방재대책 등 여러 분야에 걸쳐 파급효과가 있다. 참고로 바람지도는 활용주체 및 활용용도에 따라 요구되는 해상도가 각기 상이하므로 전술한 바와 같이 세 가지로 분류되는 것이다.

##### 2.2 해외 바람지도 개발사례

풍력발전을 선도하고 있는 유럽에서는 이미 오래 전 풍력발전 개발 시작단계에서 국가별 바람지도 및 유럽대륙 바람지도를 구축하여 정책수립 및 개발사업에서 활용하여 오고 있다. 최근에는 바람지도의 효용성 향상을 위해 최신 기법을 도입하여 기 작성된 바람지도를 갱신하거나(미국, 덴마크 등) 새로 작성하고 있으며(일본, 독일 등) 지리정보체계(GIS)와 연계하여 새로운 부가가치를 창출하려는 연구도 시도되고 있다(Short et al., 2004).

현재 바람지도 구축의 일반적인 추세는 수치바람모의에 의한 지역규모 바람장으로부터 유동모델을 이용하여 미시규모로 상세화하는 중첩방법으로 귀결되고 있다. 예를 들면, 덴마크(Frank et al., 2001)는 기상모델인 KAMM과 선형이론모델인

\* 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단, hyungoo@kier.re.kr

\*\* 부산대학교 대기과학과, hwlee@pusan.ac.kr

WASP를, 호주(Coppin et al., 2003)는 기상모델인 MM5와 난류모델이 포함된 선형이론모델인 WindScape을, 미국(Elliott & Schwartz, 2005)은 기상모델 MASS와 연속방정식에 근간을 둔 유동모델인 WindMap을 조합하여 바람지도를 구축하였다. 한편 일본(NEDO, 2005)은 기상청과의 공동연구를 통하여 상세기상모델 만으로 500m 공간해상도의 바람지도를 구축하였다.

기존의 유럽식 바람지도 작성법은 현장(in situ) 기상관측자료를 이용하여 수평방향으로는 선형이론모델을 적용하여 보간(interpolation)하고 수직방향으로는 지표면 거칠기를 고려하여 로그 풍속분포식(logarithmic wind profile equation)으로 외삽하는 방식인데, 이러한 방식은 지면경사도가 10도 미만이며 최소한 직경 5km의 평지가 확보되는 지형적인 조건이 만족되는 경우에 유효한 방법이다(Kim et al., 2000). 최근 유럽식 풍력자원 산출법으로 풍력발전단지를 설계, 시공한 중국에서 대부분의 풍력발전단지의 실제 발전량이 설계값의 60% 수준에 머무르고 있어 그 원인을 복잡지형의 효과를 무시한 단지설계 때문인 것으로 추정하고 있다는 사실은(Luo, 2006) 중국보다 더욱 복잡지형인 우리나라의 풍력발전사업자에게 시사하는 점이 매우 크다고 하겠다.

### 2.3 국내 바람지도 개발과정

우리나라의 풍력발전 보급은 2002년 산업자원부의 지원정책이 발표된 이후에 활성화되기 시작하였다. 최초로 작성된 바람지도는 전국 기상관측소의 측정자료를 단순히 선형보간하여 등치도(contour map)를 그리는 수준이었다(김진훈 등, 2003). 이후 인공위성 원격탐사자료(QuikSCAT)를 이용한 한반도 해상 바람지도가 작성되었으며(경남호 등, 2003), 이어 원격탐사자료에 NCAR/NCEP 재해석자료를 혼합함으로써 시간해상도를 풍력자원 산정이 가능한 수준으로 끌어올림과 동시에 육·해상을 망라한 한반도 종관(synoptic) 바람지도가 구축되었다(김현구 등, 2005a; Figure 1).

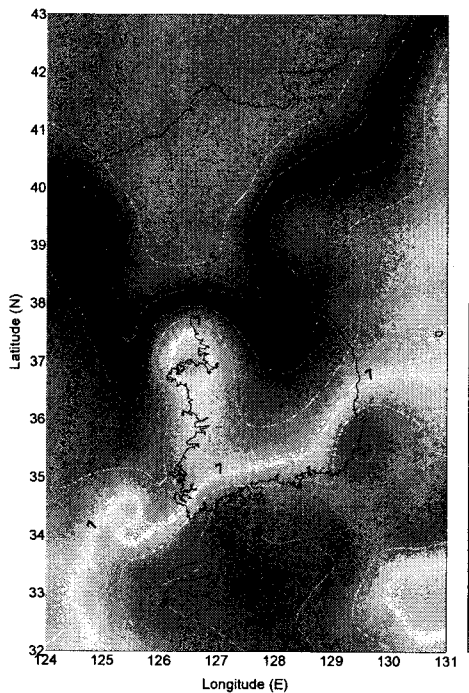


Figure 1. Synoptic wind map of the Korean Peninsula

한편 현재 연구가 진행 중인 기상바람모의에 의한 한반도

바람지도와의 비교검증을 위하여, 통계적 동적 축소법(SDDM; Statistical Dynamic Downscaling Method)을 적용하여 작성한 한반도 바람지도는 Figure 2와 같다.

SDDM은 상층기상을 지표면으로 투영하는 기상학적인 방법(Wuebbles et al., 2003)으로, 본 연구에서 상층기상은 Figure 1의 종관 바람지도를 이용하였으며, 지표고도에 따른 풍속증감과 지표면 분류에 따른 풍속분포지수의 변화 및 주변 지형과의 고도차이 등을 고려하여 지표면으로부터 50m 높이에서의 바람지도를 작성하였다(Schaffner & Remund, 2005).

지도에서 보면 일부 내륙고산지역과 남해안으로부터 남동해안 일대, 그리고 제주도의 풍력자원이 우수한 것을 알 수 있으며 특히 평균 해발고도가 1,340m이고 면적이 14,300km<sup>2</sup>인 북한의 개마고원 지역의 풍력자원 잠재량은 상당할 것으로 예상된다.

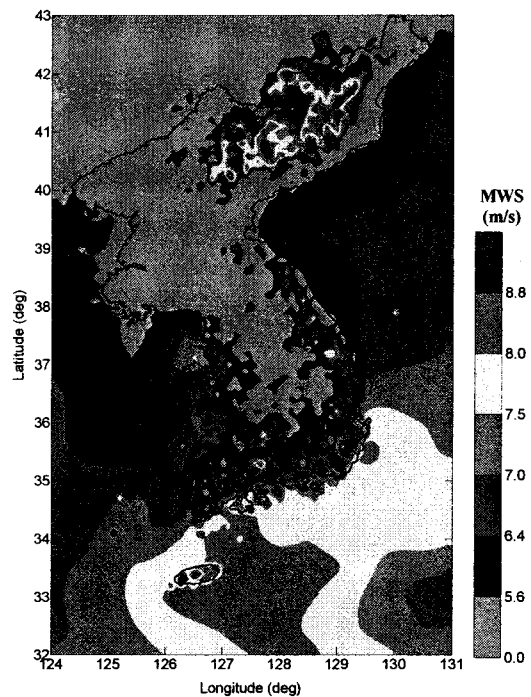


Figure 2. Korean wind map by SDDM.

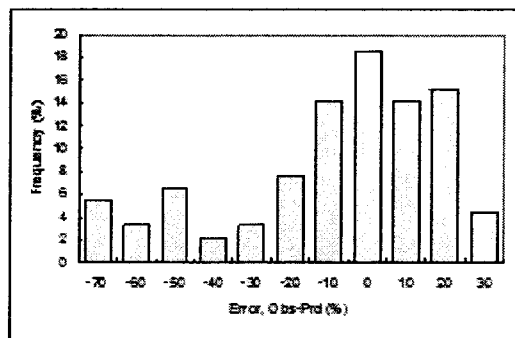


Figure 3. Error analysis of SDDM wind map

Figure 3은 SDDM 바람지도의 정확도를 검증하기 위하여 지면기상자료와의 오차분석 결과를 도시한 그래프로, 전반적으로 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. 이러한 오차원인의 대부분은 기상청 기상관측소 및 자동기상관측소의 기상자료에 의한 것으로 이들의 관측위치가 지형적, 기상학적 지역 대표성이 현저히 떨어지기 때문인 것으로 사료된다. 반면 연안

정지 관측자료 및 한국에너지기술연구소의 풍력자원 측정조사 결과와는 상관계수 0.76 수준의 양호한 적합도를 보이고 있어 Figure 2의 한반도 바람지도는 정성적으로 유효함을 확인할 수 있다. 참고로 한국에너지기술연구원의 풍력자원 측정위치는 인근 지형지물의 영향을 배제할 수 있는 위치의 30m 이상 높이에서 관측되므로 국지대표성이 만족된다.

### 3. 한반도 바람지도 구축

2005년말 현재 우리나라는 앞서의 분류에 따르면 광역규모 바람지도(wind atlas)만이 구축된 상태로, 풍력발전 보급정책 수립의 기반근거가 될 수 있는 풍력자원 잠재량 및 개발가능량의 정확한 산출이 이루어지지 못하였으며, 따라서 국가 풍력자원 평가를 위한 지역규모 바람지도의 구축이 매우 시급하게 요구되었다. 개발가능량이 과학적 근거 하에서 정량적으로 산출되지 못하면 보급목표와 전략의 당위성과 타당성이 입증되지 못한다는 것은 자명한 사실이므로 바람지도 구축의 역할은 매우 중요하다고 하겠다.

이에 한국에너지기술연구원에서는 현재 「신재생에너지 자원조사 종합관리시스템 구축사업(산업자원부)」의 일환으로 지역규모의 한반도 바람지도를 구축을 진행하고 있다. 지역규모 바람지도는 전세계적 바람지도화 추세에 따라 수치바람모의에 의한 방법을 채택하였다. 수치바람모델로는 MM5(PSU /NCAR Mesoscale Model)를 채택하였으며 공간해상도의 향상을 위해 기존 1.1km 해상도의 USGS-DEM(U.S. Geological Survey Digital Elevation Model) 대신 현존 최고의 공간해상도(90m)인 환경부 수치고도모델(ME-DEM; Ministry of Environment DEM)을 채택하

였고 토지이용자료 역시 1970년대에 작성된 기존 15분류의 USGS 토지이용모델 대신 2005년 구축된 25분류의 환경부 토지이용모델 ME-LUM(Ministry of Environment Land Use Model)을 채택하였다. 이러한 수치바람모델의 계구성으로 풍력자원 산출 시 정확도의 대폭적인 향상이 가능하다는 것은 민감도 분석연구를 통하여 이미 확인된 바 있다(이화운 등, 2005).

지역규모 한반도 바람지도는 수치모의 계산부하를 고려하여 한반도 전역에 대하여 10km 공간해상도의 바람지도를 구축한 후 중첩(nesting)에 의해 1km 공간해상도로 상세화 시키는 전략을 채택하였으며, 이때 해상 풍력자원이 우수한 것으로 예상되는(김현구 등, 2005b) 전라남도에 대하여 우선적으로 1km 공간해상도의 바람지도를 구축하고자 한다. 지역규모 바람지도 구축을 위한 수치바람모의는 기상청 RDAPS 자료와 Figure 1의 해상 기상자료를 입력조건으로 하되 기상통계학적 으로 대표성 있는 365일에 대하여 3시간 간격으로 3차원 공간 기상요소를 생성하게 되며, 생산된 기상요소는 풍력자원 산출을 위한 통계분석 과정과 현장(in situ) 관측자료를 이용한 검증단계를 거쳐 지리정보체계(GIS)와 결합된 정보형태로 2006년말 인터넷 웹페이지를 통하여 공개 서비스될 예정이다.

Figure 4는 현재까지의 계산결과로부터 작성한 월별 지역규모 한반도 바람지도로, 계절별 풍력자원의 변화특성을 잘 보여주고 있으며 정성적으로 Figure 2의 SDDM에 의한 한반도 바람지도와도 잘 일치하고 있다. 이미 잘 알려진 바와 같이 동계에는 탁월한 북서계절풍의 강풍효과에 의해 대부분의 연안과 고산지역에서 풍속등급 4 이상의 우수한 풍향을 보이지만 하계의 풍력자원은 매우 빈약하게 변하는 것을 보여주고 있다. 또한 4월에 한시적으로 강풍이 불어오는 기상학적 특성도 잘 나타나있다.

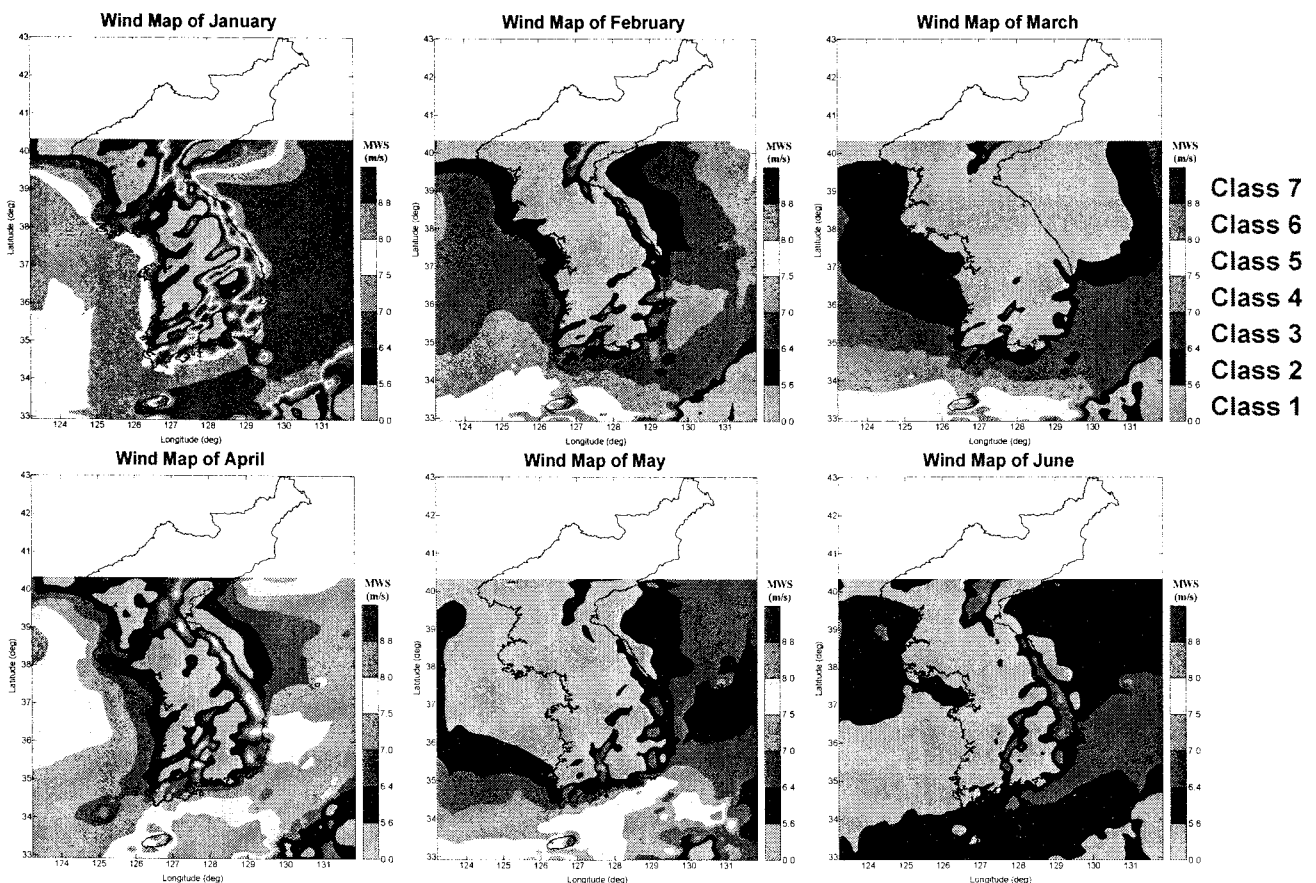


Figure 4. Korean wind map by numerical wind simulation

Figure 5는 현재 진행 중인 전라남도 지역의 바람장 수치모의 과정의 일례로 Figure 4의 한반도 바람지도 해석결과로부터 중첩계산에 의하여 상세화 모의과정을 거치게 된다. 전라남도는 리아스식 해안구조에 의해 국지적인 수렴과 발산이 복합적으로 나타나는 복잡한 풍계를 관찰할 수 있으나 이 지역 풍력 자원에 대한 평가는 수치바람모의가 완료된 이후 기상통계분석 및 검증과정을 거쳐 정량적인 결과로 제시될 것이다.

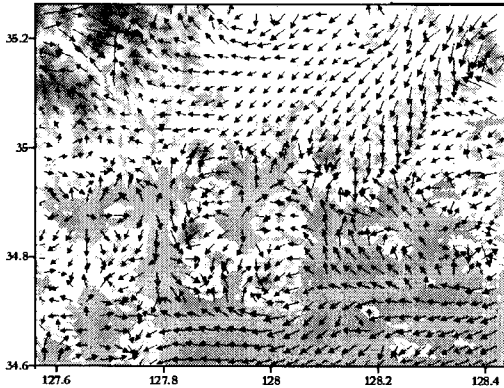


Figure 5. Simulated wind field in Jeolla Namdo region

지역규모 바람지도의 구축과 병행하여 복잡지형에서의 풍력발전 단지설계를 위한 미시규모 바람지도 구축을 위한 유동해석모택의 개발도 매우 시급한 과제라고 사료된다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 복잡지형의 영향을 정확하게 반영하여야 풍력발전량 산정결과의 정확도와 신뢰도가 향상되기 때문이다. 국내 최초의 상용 풍력발전단지인 영덕단지의 운영사례에 대한 연구(변효인 등, 2006)에 의하면 동일 단지 내에서도 각 풍력발전기별 허브높이 풍속이 큰 폭으로 차이가 나며 종관풍과 국지풍이 중첩되어 나타나는 기상일에는 심지어 단지 내 일부 풍력발전기가 매우 큰 요 각도의 편차를 갖고 운전된다는 보고는 복잡지형에 의한 바람장의 교란효과를 단적으로 설명해주고 있으며 전산유동해석(CFD; Computational Fluid Dynamics)에 의한 미시규모 바람장 해석의 필요성을 입증하는 사례라고 사료된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 풍력발전분야의 핵심정보인 바람지도의 국내의 개발동향과 현재 개발진행 중인 수치바람모의에 의한 한반도 바람지도 구축 연구의 중간결과를 소개하였다.

향후 한반도 바람지도가 완성되면 검증과정을 거쳐 우리나라 풍력자원 잠재량 및 개발가능량이 정확하게 산출될 것으로 기대되며 지리정보체계와의 연계에 의한 개략적인 경제성 분석까지도 가능하게 됨으로써 풍력발전보급도 탄력을 받아 더욱 가속화 될 것으로 예상된다.

바람지도는 그 효용가치 때문에 해외에서는 지속적으로 상세 바람지도를 작성하여 풍력발전분야를 포함한 다양한 분야에 활용하고 있으므로 우리나라에서도 향후 구축될 바람지도의 폭넓은 활용분야 개발과 더불어 바람지도 상세화 연구의 지속적인 추진이 필요할 것으로 사료된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- [1] Coppin, P.A., Ayotte, K.A. and Steggel, N., 2003, "Wind Resource Assessment in Australia - A Planners Guide," CSIRO Wind Energy Research Unit.
- [2] Elliott, D. and Schwartz, M., 2005, "Development and Validation of High-Resolution State Wind Resource Maps for the United States," Technical Report NREL/TP-500-38127, NREL.
- [3] Frank, H.P., Rathmann, O., Motensen, N.G. and Landberg, L., 2001, "The Numerical Wind Atlas - KAMM/WASP Method," Risoe-R-1252(EN), Risoe National Laboratory.
- [4] Kim, H.G., Patel, V.C. and Lee, C.M., 2000, "Numerical Simulation of Wind Flow over Hilly Terrain," J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn., Vol. 87, pp. 45-60.
- [5] Landberg, L., Myllerup, L., Rathmann, O. and Petersen, E.L., 2003, "Wind Resource Estimation - An Overview," Wind Energy, Vol. 6, pp. 261-271.
- [6] Luo, Y., 2006, "Simulation of Wind Resources in China," GEOS Workshop.
- [7] Schaffner, B. and Remund, J., 2005, "Alpine Space Wind Map: Modeling Approach," Alpine Wind Harvest, METEOTEST Report No. 7-2.
- [8] Short, W., Blair, N. and Heimiller, D., 2004, "WinDS - Wind Deployment Systems Model," Renewable Energy Modeling Summit, NREL.
- [9] NEDO, 2005, "Wind Energy Map and Local Area Wind Energy Prediction System (LAWEPS) Updated," JMA & NEDO.
- [10] Wuebbles, D., Hayhoe, K., Kunkel, K. and Liang, X.Z., 2003, "Downscaling Climate Change to the Regional Scale," Symposium on Understanding Complex Systems.
- [11] 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 2003, "한반도 해역의 해상 풍력자원 평가," 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 23, No. 2, pp. 35-41.
- [12] 김건훈, 이동현, 주영철, 허종철, 변수환, 2003, "국내 풍력 자원 측정 및 결과 분석," 한국풍력기술 및 정책워크숍, 한국풍력기술연구회.
- [13] 김현구, 최계우, 정우식, 이화운, 2005a, "한반도 바람지도 구축에 관한 연구 - I. 원격탐사자료에 의한 종관 바람지도 구축," 한국신재생에너지학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 1-10.
- [14] 김현구, 정우식, 이화운, 2005b, "한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력자원 평가," 한국대기환경학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 63-72.
- [15] 변효인, 조주석, 류지윤, 김두훈, 2006, "풍력발전단지 조성 및 운영사례 연구," 한국신재생에너지학회 춘계학술대회.
- [16] 이화운, 최현정, 이강열, 성경희, 김현구, 2005, "수치모의에 의한 풍력자원 산출 시 상세지형과 지표면 경계조건의 민감도 분석," 한국풍력에너지학회 추계학술대회.