

한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력자원 평가

Establishment of a Wind Map of the Korean Peninsula I. Evaluation of Offshore Wind Resources Using Remote-Sensing Data

김 현 구* · 이 화 운¹⁾ · 정 우 식¹⁾

포항산업과학연구원 환경에너지센터, ¹⁾부산대학교 대기과학과
(2004년 8월 16일 접수, 2005년 1월 31일 채택)

Hyun-Goo Kim*, H.W. Lee¹⁾ and W.S. Jung¹⁾
Research Institute of Industrial Science & Technology
¹⁾*Pusan National University*

(Received 16 August 2004, accepted 31 January 2005)

Abstract

In order to understand regional wind characteristics and to estimate offshore wind resources, a wind map of the Korean Peninsula was established using remote-sensing data from the satellite, U.S. NASA QuikSCAT which has been deployed for the SeaWinds Project since 1999. According to the linear regression result between the wind map data and in-situ marine-buoy data, the correlation factor was greatly improved up to 0.87 by blending the remote-sensing data of QuikSCAT with U.S. NCEP/NCAR CDAS reanalysis data to eliminate precipitation interference and to increase temporal resolution. It is found from the established wind map that the wind speed in winter is prominent temporally and the South Sea shows spatially high energy density over the wind class 6. The reason is deduced that the north-west winds through the Yellow Sea and the north-east winds through the East Sea derived by the low pressure developed in Japan are accelerated passing through the Korea Channel and formed high wind energy region in the South Sea; the same trends are confirmed from the statistical analysis of the meteorological observation data of KMA.

Key words : Wind Map, Wind Resource, Remote-Sensing

1. 서 론

신 · 재생에너지 중 풍력발전은 기술성숙도가 가장

높으며 가장 낮은 발전단가(60~90원/kWh)로 화력 발전(석유: 67원/kWh)과 필적할만한 경제성을 가진다(김현구와 최재우, 2002). 유럽, 미국 등 많은 나라에서는 이미 풍력에너지의 개발 · 보급이 활성화 단계에 있으며, 유럽은 2020년까지 전체 발전량의 12%를 풍력발전으로 보급한다는 목표를 발표한 바 있다

* Corresponding author
Tel : +82-(0)54-279-6615, E-mail: hyungoo@rist.re.kr

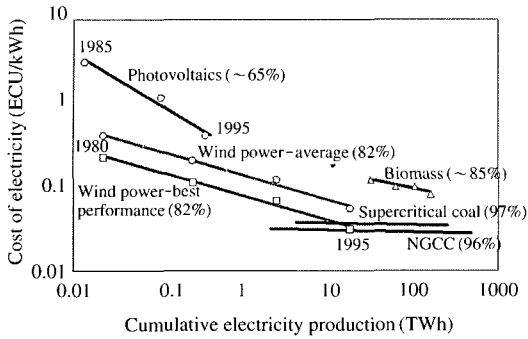


Fig. 1. Comparison of unit cost of electricity generation.

(EWEA, 2002). 이에 산업자원부에서 ‘제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획’을 확정하고, 풍력발전 사업단을 구성하여 기술개발 및 보급을 활성화 함으로써 2020년에는 전체 발전량의 9.4%를 보급하려는 목표를 설정하고 있다. 한편 전세계적인 풍력발전의 추세는 내륙 및 해안 풍력단지의 개발이 포화상태에 다다름에 따라 해상 풍력자원을 이용하는 방향으로 진행되고 있다.

해상 풍력단지는 육상 풍력단지에 비하여 설비단가 및 개발비용이 높지만 지형적 방해요인이 없기 때문에 우수한 풍력자원을 활용할 수 있으며 대규모 단지조성이 가능하다는 등의 장점이 있다. 참고로 표 1은 전세계 해상풍력단지의 개발역사로 2000년대에

Table 1. Worldwide offshore wind energy projects.

Site	Date	Country	Capacity (MW)	Turbine (kW)	No. Unit
Nogersund*	1990	Sweden	0.22	229	1
Vindeby	1991	Denmark	4.95	450	11
Lely	1994	Netherlands	2.00	500	4
Tuno Knob	1995	Denmark	5.00	500	10
Dronten	1996	Netherlands	16.80	600	28
Bockstigen	1998	Sweden	2.50	500	5
Utgrunden	2000	Sweden	9.98	1,425	7
Blyth	2000	UK	4.00	2,000	2
Middelgrunden	2001	Denmark	40.00	2,000	20
Yttre Stengrund	2001	Sweden	10.00	2,000	5
Horns Rev	2002	Denmark	160.00	2,000	80
Samso	2003	Denmark	23.00	2,300	10
Nysted	2003	Denmark	165.60	2,300	72
Frederkshaven	2003	Denmark	10.60	3,000	4
North Hoyle	2003	UK	60.00	2,000	30
Arklow Bank	2004	Ireland	25.20	3,600	7

* Dismantled 1998.

들어서는 매년 125%의 급격한 증가율을 보이고 있다(Breeze, 2004).

풍력사업에 있어서 바람지도(wind map)는 풍력발전 유망 후보지의 발굴, 사업화를 위한 경제성 평가 및 사업자금 대출을 위한 경제적 타당성 입증자료로서 매우 핵심적인 역할을 하므로, 본 연구에서는 한반도 육·해상 풍력자원을 산정하여 향후 대규모 해상 풍력발전 단지조성을 위한 필수 평가자료를 제공하고자 한다. 현재 우리나라는 지형적, 지리적, 기상학적 복잡성에 기인하여 현재까지 바람지도가 구축되지 못하였으나 바람지도는 풍력사업 이외에도 풍하중 산정, 대기환경 분석, 산불감시 등 각종 분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있는 정보이다.

2. 바람지도 구축방법

풍력에너지를 개발함에 있어서 국지적인 풍력자원 공간분포의 파악은 풍력사업의 성패를 판별할 수 있는 매우 중요한 평가단계이기 때문에 현재 풍력을 이용하는 모든 국가에서는 상세 바람지도를 작성하여 풍력발전 사업성 검토 및 풍력단지의 상세설계를 위한 필수적 기반자료로 활용하고 있다(Troen and Petersen, 1989). 바람지도의 작성방법으로는 기상관측자료의 선형적 보간에 의한 등고선법, 이론적 선형 유동모델(Jackson and Hunt, 1975)과 비선형 난류모델을 이용한 계산법, 중규모(mesoscale) 기상장으로부터 등지기법(nesting technique)을 이용하여 미시규모(microscale)로 상세화 해나가는 수치기상모의법(김현구 등, 2003), 수치기상모의법으로 해석된 기상장을 입력조건으로 하여 국지규모에서 산지지형에 의한 유체역학적 특성을 정확하게 예측하는 전산유동해석법의 혼용방법, 각종 기상관측자료를 기반으로 물리법칙에 의한 지형보정법을 이용하는 자료동화법(김용상 등, 2002) 등이 있다.

국내 풍력사업의 초기 단계에 바람지도에 대한 이해력 부족으로 74개소의 기상관측소의 측정자료만을 단순보간하여 한반도 바람지도를 작성한 바 있으나(김건훈 등, 2003; 그림 2), 복잡한 산지지형에서는 측정지점의 국지기상 대표성을 보장받기 어려울 뿐 아니라 74개소의 측정지점은 충분한 공간해상도를 제공하지 못하므로 바람지도로서의 신뢰도를 보장받기

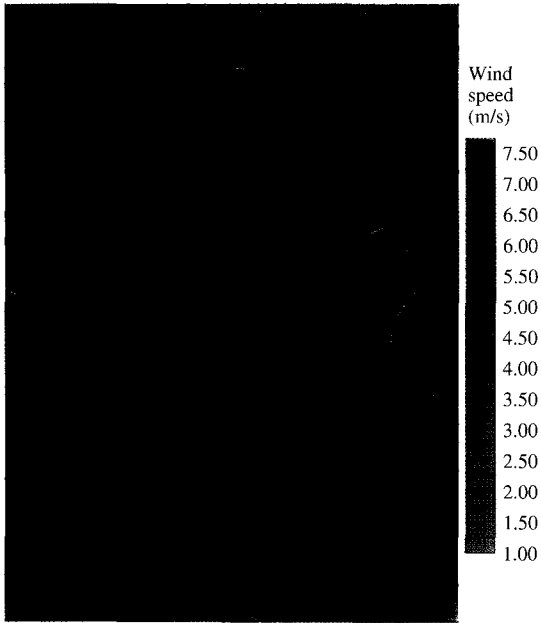


Fig. 2. Korean wind map proposed by KIER; Wind speed (m/s).

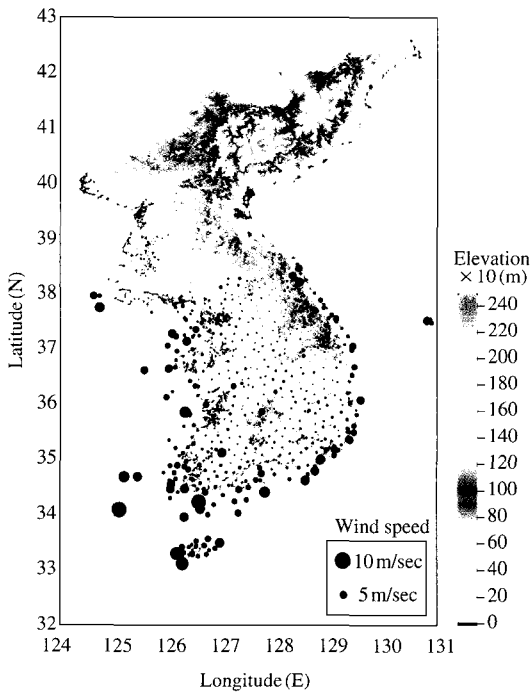
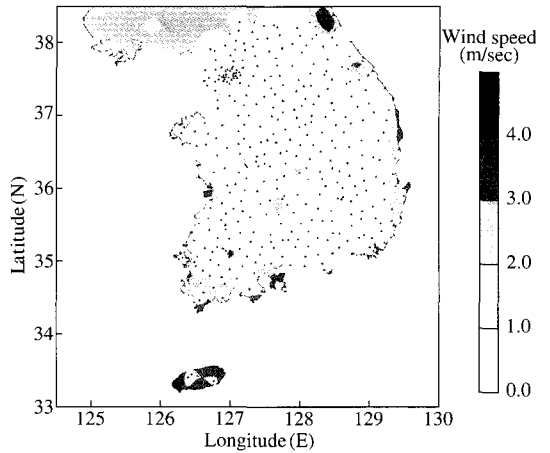
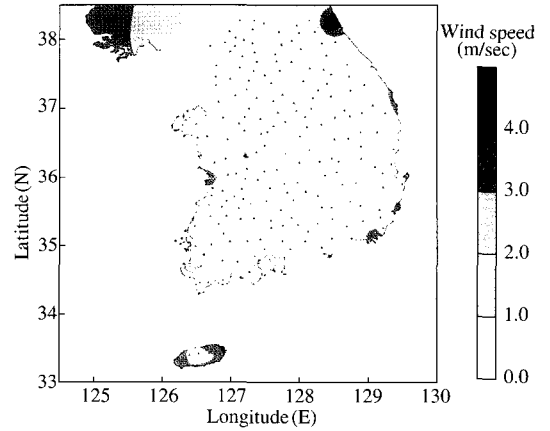


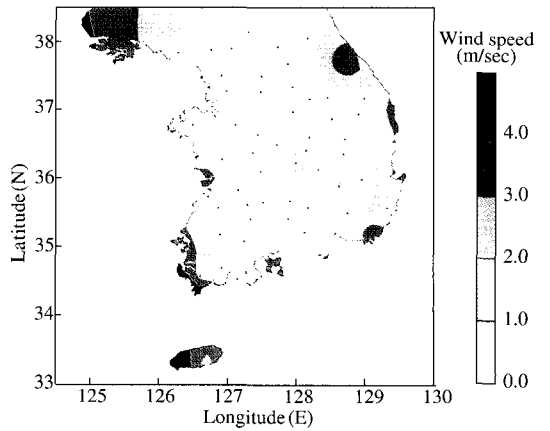
Fig. 3. Mean wind speeds at the observation sites.



(1) All sites (541)



(2) Half sites (245)



(3) KMA sites (76)

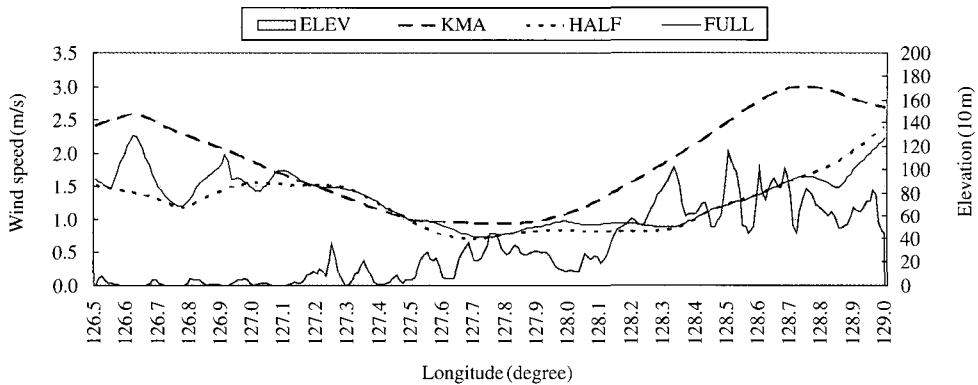
Fig. 4. Contour maps of wind speed for different numbers of the observation sites.

어렵다.

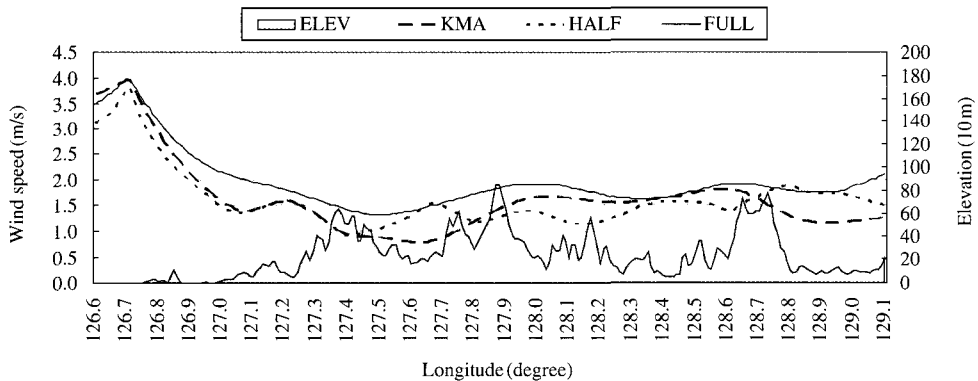
그림 3은 한반도 남한의 육·해상에 산재한 기상청(KMA; Korea Meteorological Administration) 기상관측소 76개소, 무인관측소 433개소, 해양수산부(MOMAF; Ministry of Maritime Affairs & Fisheries) 등대관측소 27개소, 해상부이(marine buoy) 5기 등 540여 측정지점의 5년간(1999~2003) 기상자료를 수합, 정리한 분포지도로 평균풍속에 비례하는 크기의 원으로 풍속분포 특성을 나타내었다. 이 자료를 크리깅 지리통계적 격자화법(Kriging geostatistical gridding method; Cressie, 1991)을 이용하여 등고선 지도를 생성한 다음 동서 절단면 풍속변화를 그림 4에 도시하였는데, 등고선 지도 작성시 541개소의 기상자료를 모두 사용하더라도 지형효과를 전혀 반영하지 못하는 결과를 보이고 있어 현실적으로 단순보

간 등고선법은 우리나라에는 적용이 불가능한 방법임을 확인할 수 있다.

참고로 그림 4와 5는 각각 기상청 관할 기상관측소급 측정소 76개소의 기상자료만을 이용하여 크리깅 격자화법에 의해 생성된 풍속의 공간분포도 및 이를 각각 북위 37°30'와 북위 36°00'을 따라 절개한 단면분포(긴 점선)와 무인관측소 245개소의 기상자료를 추가로 사용한 경우(짧은 점선), 전체 541개소의 기상자료를 적용한 경우(실선)의 단면분포를 비교한 그래프이다. 76개 기상관측소 측정자료 만에 의한 공간분포와 단면분포는 모두 나머지 경우와 완전히 다른 분포경향을 보이고 있으며 모든 경우에 있어서 국지지형에 의한 풍속변화 특성을 제대로 반영하지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 공간해상도의 측면에서 검토하더라도 전체 측정소 541개소의 자료



(1) Wind speed profiles along 37.50N.



(2) Wind speed profiles along 36.00N.

Fig. 5. Cross-sectional wind speed profiles along latitude lines.

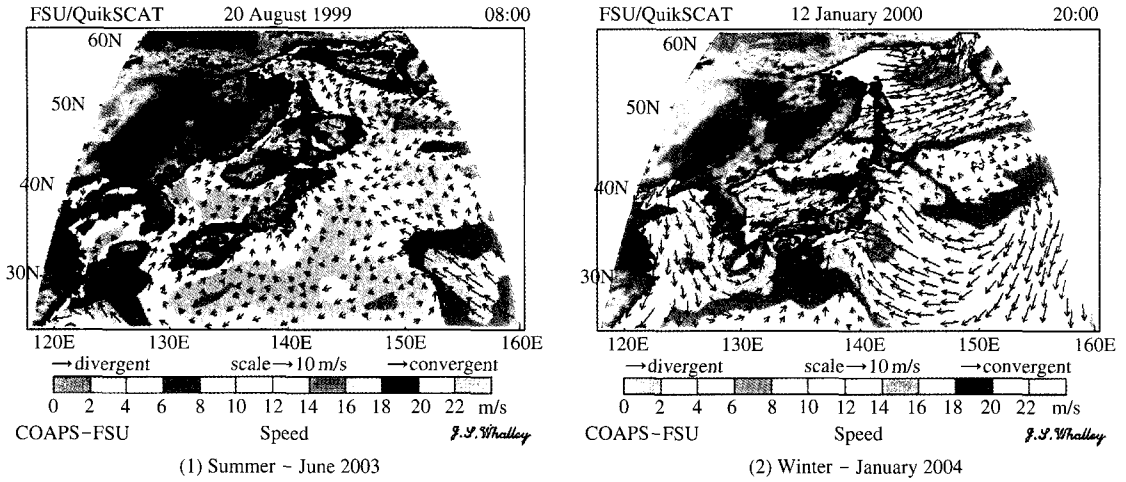


Fig. 6. Sea wind distributions around the Korean Peninsula.

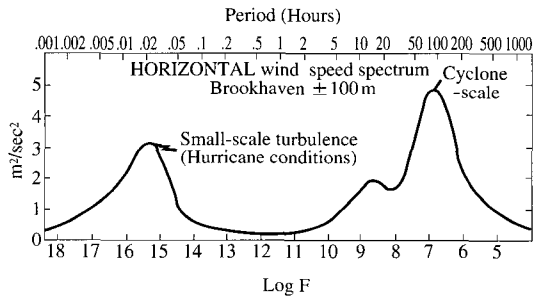


Fig. 7. The Van der Hoven spectrum.

를 모두 사용한다고 하더라도 측정소간의 이격거리는 수 km 이상이며 한반도의 지형특성에 의해 이러한 간격 사이에는 심지어 산맥이 가로막고 있는 경우도 있으므로 기상요소간의 상관성이 유지되기 어렵다는 점은 쉽게 판단 가능하다.

3. 한반도 바람지도

풍력자원 평가를 위한 기상자료는 기상관측소, 동대관측소, 공항관제탑, 해상부이 등으로부터 확보할 수 있지만 이들은 1-D 측정자료이므로 내륙에서는 앞서 언급한 지형변화 요인과 공간해상도의 제약이 따르며 해상에서도 소수의 해상부이 만으로 전체상을 총괄할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 최근 해상

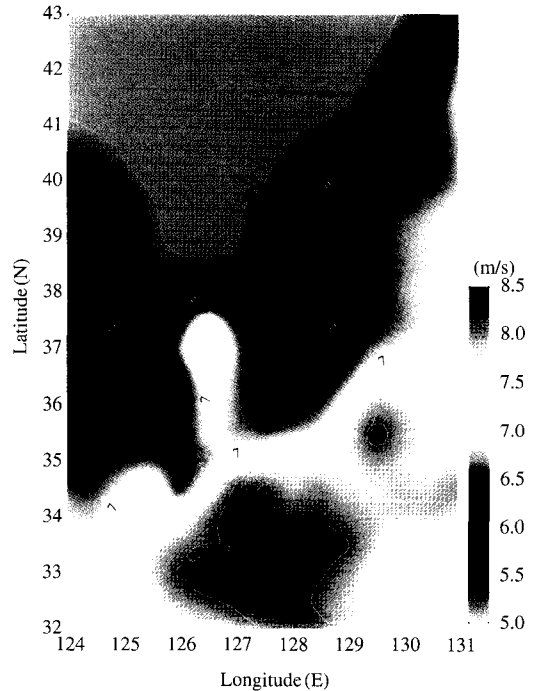


Fig. 8. Synoptic wind map of the Korean Peninsula.

바람지도 작성법으로 활용되기 시작한 (Hasager *et al.*, 2003) 2-D 인공위성 원격측정자료를 활용하되 종관 기상자료의 자료동화법을 적용하여 한반도 바람지도를 구축하였다.

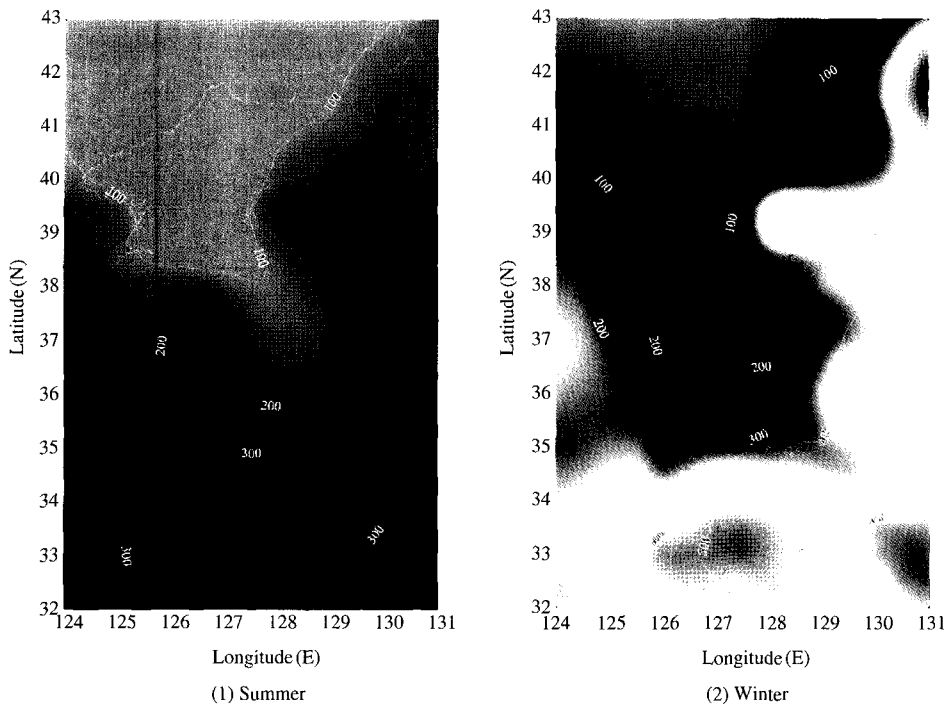


Fig. 9. Seasonal distributions of wind energy density.

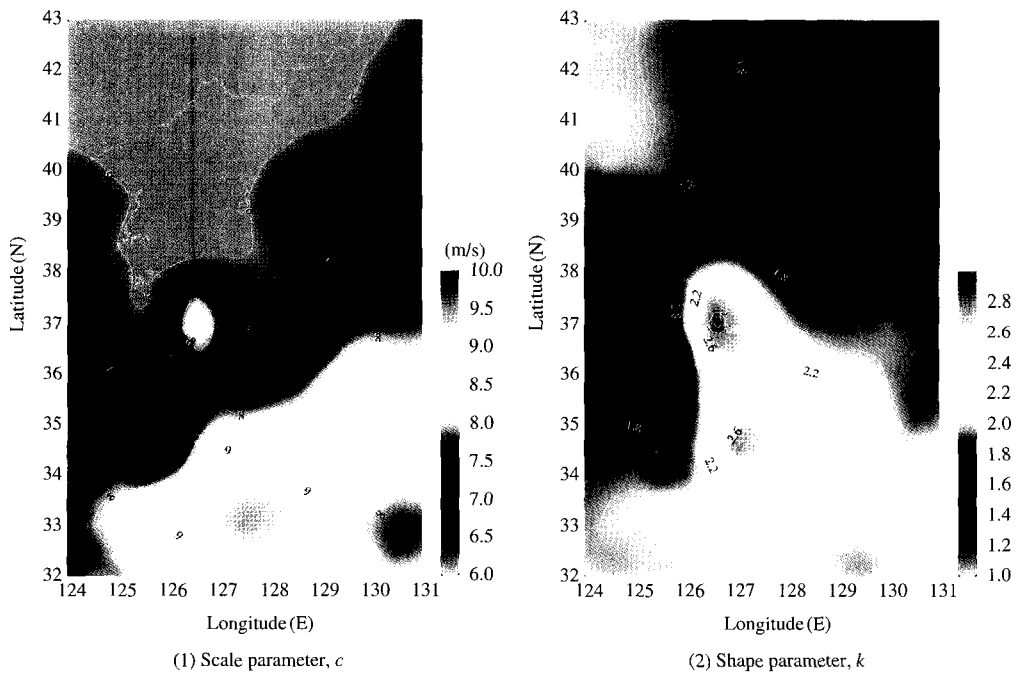


Fig. 10. Spatial distribution of Weibull parameters.

미국 NASA QuikSCAT 인공위성은 1999년 하반기부터 SeaWinds 프로젝트에 투입되어 운용 중인데, 해수면으로 극초단파를 발사하고 회수되는 신호강도로부터 해파(sea wave)의 진행방향과 전파속도를 산출하고 이를 다시 풍향과 풍속으로 변환하는 산란측정 기법(scatterometry)을 이용한다. 그림 6은 QuikSCAT에 의해 측정된 후 재구성된 하계와 동계 한반도 주위 해상의 전형적인 바람장을 보여주는 예이다.

한편 QuikSCAT은 지구 전체를 스캔하는 인공위성이므로 동일지점에서의 회귀주기가 4일로 측정간격이 상당히 넓으며 측정 기술상의 제약에 의해 강우시 빗방울의 산란에 의한 오차요인이 크기 때문에 본 연구에서는 미국 NCAR/NCEP CDAS (Climate Data Assimilation System) 재해석(reanalysis) 기상자료와 (Kalnay, 1996) 혼합(blending)시킴으로써 강수에 의한 오차요인을 제거하고 시간해상도를 6시간 간격으로 향상시켜 반더호벤(Van der Hoven) 스펙트럼(그림 7) 중 중관(synoptic) 및 일간(diurnal) 스펙트럼을 포함하도록 하였으며 바람지도 작성영역을 육상으로부터 확대하였다. 두 자료의 혼합은 기본적으로 2차원 3차 B-스플라인(cubic B-splines) 결합보간법(joint interpolation)을 사용하되 적절한 로우패스 필터(low-pass filter) 및 하이패스 필터(high-pass filter)를 적용하였다(Milliff *et al.*, 1999).

풍력자원은 최소한 5년간의 풍황자료를 사용하여 평가되어야 하므로 인공위성 측정자료는 1999년 하반기부터 2003년말까지 약 4년반의 가용자료를 모두 자료동화에 활용하여 그림 8과 같이 한반도 지역

의 풍속 분포지도를 작성하였다.

풍력자원의 정량 평가척도로서 에너지밀도(energy density, $P[W/m^2]$)가 사용되는데, 에너지밀도는 다음 식과 같이 풍속의 확률밀도함수(probability density function, f)의 적분식으로 정의된다.

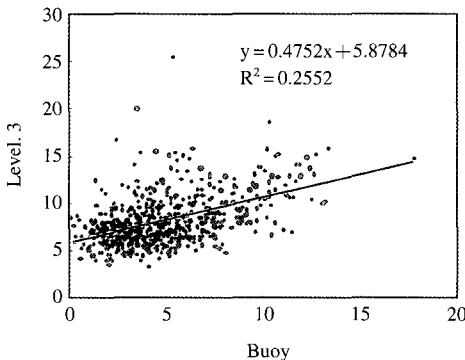
$$P(u) = \frac{1}{2} \cdot \rho \int_0^\infty u^3 f(u) du = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \Gamma \left[1 + \frac{3}{k} \right] \quad (1)$$

일반적으로 풍속의 확률밀도함수는 통계적으로 등급계수(scale parameter, $c[m/s]$)와 형상계수(shape parameter, k) 두 개의 인자만으로 표현이 가능한 와이불(Weibull) 확률분포로 나타낼 수 있다. 즉,

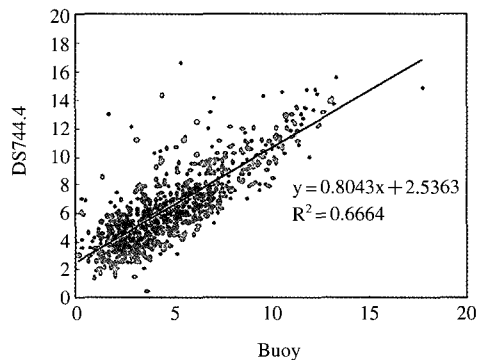
$$f(u) = \frac{k}{c} \left[\frac{u}{c} \right]^{k-1} \exp \left\{ - \left[\frac{u}{c} \right]^k \right\} \quad (2)$$

참고로 식에서 $u[m/s]$ 는 풍속, $\rho[kg/m^3]$ 는 공기밀도 그리고 Γ 는 감마함수(Gamma function)이다.

그림 9는 (1)하계와 (2)동계를 비교한 계절별 바람지도로 동계에는 북서계절풍의 영향으로 하계에 비하여 풍력자원이 월등히 높음을 확인할 수 있다. 참고로 본 연구에서는 해상 풍력자원의 평가를 주목적으로 설정하였기 때문에 육상에서는 지형의 영향을 제외하였으나 궁극적으로는 지형을 고려한 3차원 자료동화에 의해 바람지도가 작성되어야 할 것이다. 더욱이 해상 풍력발전은 원해가 아닌 근해상에 조성되므로 반드시 지형의 영향이 고려되어야 하며, 따라서 본 바람지도는 정성적으로는 한반도의 전반적인 풍환경 특성과 정량적으로는 풍력자원 잠재량 및 분포



(1) QuikSCAT data vs. Buoy



(2) Blended data vs. Buoy

Fig. 11. Linear regressions between satellite data and in-situ buoy measurements.

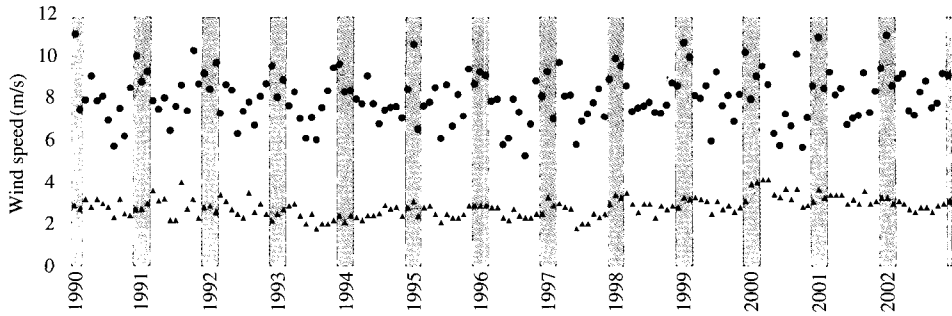


Fig. 12. Variation of surface and upper wind speeds at Pohang Weather Station. (circles: wind speed at 925 hPa by radio-sonde, triangles: wind speed at 15 m above ground level, lines: moving average with three months band-width, grey bars: winter period)

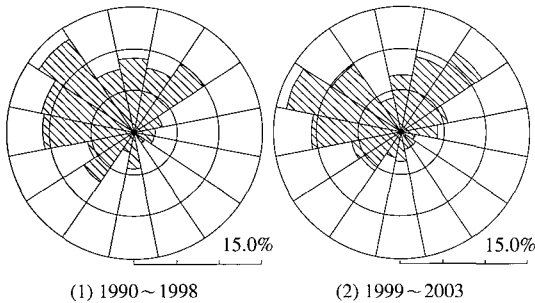


Fig. 13. of wind roses at 925 hPa for the periods of 1990 ~ 1998 and 1999 ~ 2003.

현황을 파악함과 동시에 향후 상세한 공간해상도의 바람지도 구축을 위한 초기 입력자료로서 그 의미가 있다고 사료된다.

그림 10은 풍속 평균값에 관계하는 (1) 등급계수와 풍속 편차에 관계하는 (2) 형상계수의 공간분포도이며, 서해상에서 작은 k 값을 보이고 있어 풍속의 산포가 크음을 알 수 있다.

본 연구에서 적용한 인공위성 원격측정자료를 이용하여 바람지도를 구축하는 방법에 대한 정확도를 검증하기 위해 해상부이 실측자료와의 비교분석을 실시하였다. 그림 11은 그 중 전라남도 칠발도 해상부이 (34° 48'N, 125° 47'E)에서 관측된 기상자료와 본 연구에서 구축한 한반도 바람지도 간의 상관분석 결과로 (1) QuikSCAT 위성자료만을 이용하였을 때에는 실측자료와 낮은 상관도를 보이는 반면 (2) NCEP/NCAR 재해석자료를 혼합시킴으로써 실측자료와의

상관계수 (correlation factor)가 0.87 이상으로 향상됨을 확인하였으며 이를 통하여 구축된 바람지도의 신뢰도를 검증할 수 있었다.

한편 풍력자원을 평가함에 있어서 반드시 검토하여야 할 사항은 평가에 사용된 기상자료가 장기간의 기상개황을 대표할 수 있는가 하는 것이다. 일반적으로 풍력발전기의 수명은 20년 이상으로 장기간 운전을 고려하여 정확한 풍력자원 평가에 따른 경제성 분석이 필요하기 때문인데, 본 연구에서는 비록 1999년부터 2003년까지 최근 5년간의 원격탐사자료 및 기상자료를 이용하였으나 해당기간의 기후변화 특성을 확인하기 위하여 포항기상대에서 관측된 1990년부터 2002년까지의 장기간 지면기상 및 라디오존데를 이용한 고층기상 측정자료를 분석하였다. 참고로 지면기상의 경우에는 장기간 동안 관측소 자체의 이동이나 지형지물의 변화에 의하여 기후변동 이외의 요인에 의한 변화가 수반되므로 라디오존데로 관측된 고층의 중관기상 변화를 분석하는 것이 타당하다고 사료된다. 그림 12는 포항기상대에서 관측된 13년간의 지면 및 고층기상 중 월평균 풍속의 변동을 비교한 그래프로, 원형 심볼은 925 hPa 표준압력면에서의 풍속이며 삼각형 심볼은 지면 15 m 높이에서 관측된 풍속이다. 참고로 실선은 계절변동을 확인하기 위하여 3개월의 폭으로 계산된 이동평균이다. 그래프에서 보면 계절변동은 확연하게 나타나고 있지만 1990년부터 1998년까지의 평균풍속은 7.94 m/s, 1999년부터 2002년까지의 평균풍속은 8.28 m/s로 약 4% 정도 풍속이 상승한 것으로 분석되어 전반적으

Table 2. Regional statistics of mean wind speed.

Mean wind speed (m/s)	Coast lines			
	West	South	East	Jeju Island
Seashore stations	2.3	2.7	3.1	—
Island stations	3.3	3.8	—	4.1

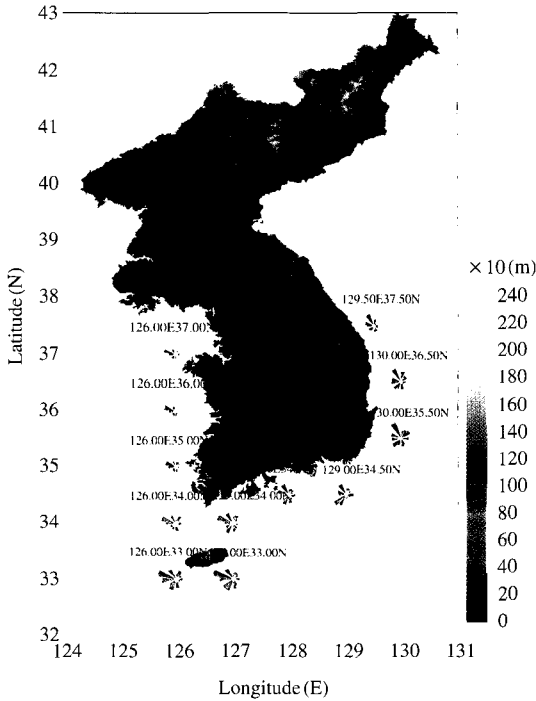


Fig. 14. Rose diagrams of offshore energy density.

로 볼 때 풍력자원 평가에서 있어서 고려하여야 할 수준의 기상학적 변동은 아닌 것으로 분석되었다. 한편 그림 13은 각각 925 hPa 표준압력면에서 1990년부터 1998년까지의 바람장미와 1999년부터 2002년까지의 바람장미를 비교한 것으로, 다소간의 차이는 보이지만 전반적인 풍향변동은 없는 것으로 나타났으며, 따라서 풍력자원 평가라는 관점에서 종합적으로 평가하건대 본 연구의 해석기간은 평년의 기후특성과 큰 차이가 없는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서 구축한 한반도 종관(synoptic) 바람지

도에 의하면(그림 7) 전반적인 상황을 고려할 때 풍력자원이 가장 우수한 곳은 남해상으로, 수심분포가 해상 풍력발전에 적합한 근해상에는 향후 대규모 해상단지 개발이 용이할 것으로 판단된다. 참고로 구축된 바람지도를 종관 바람지도라고 명명한 것은 실제 풍력발전 단지개발 시 필요한 상세(detail) 바람지도와 구별하기 위해서이다.

일반적으로는 겨울철에 북서계절풍의 영향으로 한반도 해상 중 서해상의 바람이 가장 강할 것이라고 생각하지만 실제 관측자료를 분석해 보면 이와는 다른 양상으로 분석된다. 즉, 풍계의 빈도는 북서풍계열의 바람이 많은 경우를 보이지만, 동해상의 풍계는 한반도 동쪽을 따라 발달한 산맥의 차폐영향으로 북북서풍 계열로 편향되어 있으며(그림 14) 계절적으로 고기압의 이동에 의해 유도되는 북동풍계열의 바람이 대한해협을 통과하는 경우에는 협곡효과에 의해 풍하층에 강한 바람이 나타날 수 있는 지형적, 지리적 조건이 형성되어 있다. 원격탐사자료의 재가공에 의해 한반도 주위 해상 풍계를 보여주는 그림 6를 참고하면, 겨울철의 경우 대륙을 벗어난 북서계절풍은 서해안으로 직접 유입됨으로 인하여 육지에 의한 마찰저항이 발생하지만 서해를 거쳐 남해를 지나 태평양으로 환기되는 풍계는 해상에서 충분히 가속되어 남해상에 이르러서는 상당한 풍속을 가지게 되는 것으로 나타나고 있다. 따라서 이러한 종관적 순환구조와 지리적인 배치구조로 인하여 남해상에서 가장 강한 풍계가 형성됨을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 한편 이러한 풍환경 특성을 원격탐사에 의한 간접적인 기상자료가 아닌 기상관측소의 직접적인 측정자료를 이용하여 분석하여 보았는데, 표 2에 제시된 바와 같이 기상관측자료의 통계분석 결과에서도 서해 해안지역에 위치한 기상관측소의 평균풍속은 2.3 m/s인 반면 남해안과 동해안의 평균풍속은 각각 2.7 m/s, 3.1 m/s로 서해안의 바람이 강하지 않다는 것을 확인할 수 있다. 해안뿐만 아니라 도서에 위치한 기상관측소의 평균풍속 역시 서해안의 3.3 m/s 보다 남해안이 3.8 m/s로 15% 정도 높은 풍속을 보이고 있어 전술한 분석의 신빙성을 뒷받침해주고 있다.

한편 풍력발전기는 25 m/s 이상의 강풍 시에는 구조안정성 가동을 중단하기 때문에 풍력자원을 해석함에 있어서 태풍의 영향을 배제하여야 실질적으로

유효한 풍력자원의 평가가 가능하다. 따라서 바람지도를 작성한 해당기간 동안 한반도에 태풍이 영향을 미친 날을 제외하였을 때(기상청, 1999~2003) 감소되는 풍력자원은 남해상에서 최대 5% 이내인 것으로 계산되었으며, 따라서 구축된 바람지도의 태풍에 의한 풍력자원 과대평가 경향은 그리 크지 않음을 정량적으로 확인하였다.

우리나라는 국토의 70%를 차지하는 산지지형과 대륙과 해양의 경계에 위치한 지정학적 요인에 의해 산곡풍, 해륙풍, 계절풍 등 다양하며 복잡한 기상변화가 수반되는 관계로 유럽에 적용되었던 방식으로 바람지도를 구축하기는 어려운 여건이었으며, 그러한 사유로 본격적으로 풍력발전사업이 시작되었음에도 불구하고 한반도 전체의 풍력자원 분포현황을 파악할 수 있는 바람지도가 준비되지 못하였다. 더욱이 풍력발전 단지개발 단계에서 절대적으로 요구되는 상세 바람지도 구축을 위한 방법론도 구체적으로 정립되지 못하였기 때문에 현재 진행 중인 풍력발전 단지조성 사업은 외국의 풍력자원 평가업체에 의존하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 한반도의 풍력자원 분포현황을 개략적으로 파악할 수 있는 종관 바람지도를 구축하였으며 향후 이를 바탕으로 상세 바람지도를 구축하여 나갈 것이다.

풍력발전 선진국인 덴마크(EMD, 2001), 미국(Elliott *et al.*, 1986), 영국 등은 국가 전체의 종관 바람지도와 각 지역별 상세지도를 구축하여 풍력사업에 활용하고 있으며 독일은 지방자치단체별로 해당 지역의 상세 바람지도를 구축하여 풍력사업 이외에도 도시환기를 고려한 건축물 인허가 등의 각 분야에서 활용하고 있음을 고려할 때 국내에서도 본 연구를 시작으로 향후 구축될 상세 바람지도의 활용도는 매우 높을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 기상청(1999~2003) 기상연보, 기후국 기후예측과.
- 김건훈, 이동현, 주영철, 유승덕, 허종철, 변수환(2003) 국내 풍력자원 측정 및 결과 분석, 한국풍력기술 및 정책워크샵, 한국풍력기술연구회, 72-80.
- 김용상, 박옥란, 황승연(2002) 기상연구소의 국지규모 기상 분석 및 예측시스템(KLAPS)의 실시간 운영, 한국기상학회지, 38(1), 1-10.
- 김현구, 최재우(2002) 풍력에너지 이용 및 개발현황, RIST 연구논문, 16(4), 479-485.
- 김현구, 최재우, 손정봉, 정우식, 이화운(2003) 풍력발전 단지 조성을 위한 바람환경 분석, 한국대기환경학회지, 19(6), 745-756.
- 정우식, 이화운, 김현구(2003) 포항지역의 겨울철 남서계열 탁월풍 현상에 관한 분석 및 수치모의, 한국지구과학회지, 24(6), 533-548.
- Breeze, P. (2004) *The Future of Global Offshore Wind Power: The technology, economics and impact of wind power generation*, Reuters Business Insight.
- Cressie, N.A.C. (1991), *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pp.
- Elliott, D.L., C.G. Holladay, W.R. Barchet, H.P. Foote, and W.F. Sandusky (1986) *Wind Energy Resource Atlas of the United States*, Pacific Northwest Laboratory, U.S. Department of Energy.
- EMD (Energi-og Miljodata) (2001) *The Danish Wind Resource Map with Data Export to GIS-Format*, <http://www.emd.dk/>.
- European Wind Energy Association and Greenpeace (2003) *Wind Force 12 Launch*.
- Hasager, C.B., O. Rathmann, M. Nielsen, R. Barthelmie, S. Pryor, J. Hojstrup, J. Badger, P. Norgaard, and P. Lundsager (2003) *Wind Energy Calculated from SAR and Scatterometer Satellite Data*, Risoe National Laboratory, ESA Workshop & Renewable Energy, Italy.
- Jackson, P.S. and J.C.R. Hunt (1975) *Turbulent Wind Flow Over a Low Hill*, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 101, 929-955.
- Kalnay, E. *et al.* (1996) *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Milliff, R.F., W.G. Large, J. Morzel, G. Danabasoglu, and T.M. Chin (1999) *Ocean General Circulation Model Sensitivity to Forcing Scatterometer Winds*, *J. of Geophysical Research, Oceans*, 105(C5), 11337-11358.
- Troen, I. and E.L. Petersen (1989) *European Wind Atlas*, Risoe National Laboratory, Denmark.