

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol. 23, No. 2, 2003

## 한반도해역의 해상 풍력 자원 평가

# An Assessment of Offshore Wind Energy Resources around Korean Peninsula

경남호\*, 윤정은\*\*, 장문석\*, 장동순\*\*

Kyong, N.H.\*, Yoon, J.E.\*\* , Jang, M.S.\* , Jang, D.S.\*\*

**Key words** : 와이불 분포(Weibull distribution), 해상 풍력 자원(Offshore wind resource), ADEOS II 위성(ADEOS II satellite), QuikSCAT Level 3 데이터( QuikSCAT level 3 data)

### Abstract

In order to investigate the offshore wind resources around Korean peninsula, the "QuikSCAT Level 3" data by ADEOS II satellite was analyzed from Jan 1 2000 to Jan 18 2003. The "SeaWinds" on the satellite is a specialized device for microwave scatterometry that measures near-surface wind speed and direction under all weather and cloud conditions.

Wind speed are extrapolated from 10m to 60m with the exponent of 1/10 in the power law model. It has been found that the high wind energy potentials are prevailing in the South sea and Southeastern end of Korean peninsula.

#### ■ 기호설명 ■

A : Weibull 분포의 Scale parameter [m/s]  
k : Weibull 분포의 Shape factor [-]  
u : 풍 속 [m/s]  
a : the power law exponent

#### 1. 서론

재생가능 에너지원 중, 상대적으로 뛰어난 경제성과 기술 신뢰성을 확보한 풍력발전은 최근 거론되고 있는 기후변화 협약에 의한 온실가스의 방출 억제에 능동적으로 대처 할 수 있는 새로운 발전

\* 한국에너지기술연구원  
\*\* 충남대학교 환경공학과

\* Korea Institute of Energy Reserch  
\*\* Dept. of Environmental Engineering, Chungnam University

기술로서 각광을 받고 있다.

향후 국내에서도 실질적인 정부 지원책이 활성화되고 전력 사업 인허가나 계통선 연결 등에 관한 법령이 정비되면, 육상 풍력 발전 시스템의 보급은 가속될 것으로 예상되고 있다. 그러나 선진 외국의 풍력 발전 단지 건설 사례와 우리나라 제주 행원, 강원도 대관령의 풍력 발전 단지 조성 계획 시의 난점이었던 부지사용과 소음, 시계, 전파 등의 거주 환경 및 민원 문제의 사례는 거의 동일하며 이로 인해 육상 풍력 발전 시스템의 보급은 제한적이 될 수밖에 없다. 더구나 우리나라는 국토가 협소하고 인구 밀도가 높아서 육상 풍력 발전의 보급량은 결국 한계에 봉착하게 될 것이다.

이에 비해 해상 풍력 발전은 육상에서와 달리고 풍력 에너지 밀도로서, 균일한 풍속·풍향의 분포, 초대형 풍력 발전 시스템 건설의 가능성, 대형 부지 확보의 용이성, 거주 환경 문제(소음, 그림자, 전파방해 등)의 제한 조건이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 선진 외국의 사례를 보면 해상 풍력 발전은 대단위가 될 수록 경제성이 향상된다.

우리나라 한반도는 삼면이 바다로서 인근의 해양 자원이 풍부하고 조선 산업, 석유 탐사 등을 통해 해상 구조물기술은 세계적으로도 선두 그룹에 속해 있다. 풍력 발전기 설계, 제작 기술은 다소 낙후되어 있지만 연구 개발을 통해 보완하여 국내의 선진 해상 구조물 기술과 접합한다면 제한적인 육상 풍력 발전에 비교할 수 없이 큰 국내 청정 에너지를 확보할 수 있다.

해상 풍력 에너지 자원의 발굴과 활용은 기후 협약을 앞두고 97%이상의 에너지를 수입 화석연료에 의존, 소비하고 있는 우리나라의 수입 대체

와 온실가스 저감에 지대한 기여를 할 수 있는 대안이 될 수 있다.

해상 풍력 발전 단지의 건설은 막대한 비용이 소요되는 사업이므로 건설하기 전에 반드시 기존의 자료를 참조하여 특정지역을 선정하고, 이 지역에 대한 실질적인 풍속·풍향자료의 수집과 분석을 선행하여 많은 투자에 대한 효용성 등을 제고하여야 한다.<sup>1) 2)</sup>

해상 풍황 평가를 수행 했던 선진 외국의 선례를 참고해 보면 다음과 같은 방법들이 있다.

- Mesoscale 기상예측
- 해변의 기상탑으로부터의 예측
- 해상 기상탑 운용
- 인공 위성 측정 자료 분석

Mesoscale 기상 예측은 이미 기상청에서 수행하고 있지만 년 단위의 풍황, 풍속 특성을 기상탑에서 측정하는 것처럼 10분 단위로 예측한다는 것은 현재의 슈퍼 컴퓨터로는 역부족이며, 예측을 한다 하여도 신뢰성이 낮고, 해상도도 커서 직접적으로 활용하기가 곤란하다.

해변에 위치한 기상탑으로부터의 예측은 전국 64개 기상청 산하 기상관측소, 일부지역의 도서 및 내륙 일부 지역 및 해상부이(Bouy)에서 관측된 풍속과 풍향자료를 이용한 풍력자원 특성 분석이 한국에너지기술연구소에 의해 이미 이루어져, 어느 정도의 풍력 자원량에 대한 판단을 할 수는 있으나, 자료의 신뢰성이 떨어지고 지역적 조건에 크게 영향을 받는 풍력자원의 특성 때문에 역시 활용하기가 곤란하다.

해상 기상탑의 운영 자체도 비용이 고가이므로 우선 우리나라의 전체적인 풍황을 파악하고 가능 지역을 선정하는 다음에 수행하는 것이 바른 순서일 것으로 생각된다.

1) WIND FORCE 12, A blue print to achieve 12 percent of the world's electricity from wind power by 2020, EWEA and Greenpeace, 2002

2) 해상 풍력발전 시범단지 기획에 관한 연구, 2003, 한국에너지기술연구원

따라서, 현재로서는 미국 NASA에서 운영하고 있는 인공위성 ADEOS II의 QuikSCAT Level 3 데이터(SeaWinds on QuikSCAT Level 3 Daily, Gridded Ocean Wind Vectors)를 분석하는 방법이 최선이라 사료되어, 본 연구에서는 측정 자료의 특성과 분석 결과를 기술하였다.

## 2. ADEOS II QuikSCAT 위성

1999년 6월 19일 발사된 ADEOS II 위성은 모든 기상 조건 하에서 해면으로부터 10m 높이의 풍속과 풍향을 측정하며, 빙하가 존재하지 않는 해면의 90% 영역에서 이루어진다(그림 1).



그림 1. 위성 데이터의 이미지

데이터는 위성의 scatterometer에서 발사하여 되돌아오는 극초단파의 강도를 측정함으로써 얻어진다. 이는 대기 운동은 극초단파에 본질적인 영향을 주지 않으며, 바람에 의해 형성되는 해면의 물결과 작은 파도만이 되돌아오는 파장의 강도( $\sigma_0$ )를 변화시키는 메카니즘에 바탕을 둔다. 되돌아오는 파장의 강도( $\sigma_0$ )를 이미지화한 그림 2에서 위성의 궤도를 시각적으로 확인할 수 있다.

지구 전 영역에 대한 데이터 수집은 회귀 주기 4일 동안 이루어지며, 지구를 한 바퀴 도는데 소

요되는 시간은 101분, 궤도면이 적도면과 이루는 경사각은  $98.616^\circ$ 이다(표 1). 위성 설계 시 측정 기기의 기본 요구사항은 표 2에 나타난 바와 같으며, 실제 풍속 벡터의 96%를 측정하는 정확도를 가진다.<sup>3) 4) 5)</sup>



그림 2. 측정된 파장 강도의 이미지

표 1. ADEOS II QuikSCAT 위성의 궤도 상수

궤도 상수	
회귀주기	4일(57회 궤도회전)
궤도 주기	101 분(14.25궤도/day)
Local Sun Time at Ascending Node	6:00 A.M. $\pm$ 30분
적도에서의 고도	803 km
궤도 경사각	$98.616^\circ$

표 2. 측정기기의 기본 요구사항

	기본 요구사항	적용영역
풍속	2m/s	3 - 20m/s
	10%	20 - 30m/s
풍향	$20^\circ$	3 - 30m/s
공간격자	25km	$\sigma_0$ cells
	25km	풍속벡터 Cells
측정영역	빙하없는 바다의 90%	-
측정기간	36개월	-

3) 위성 데이터에 대한 보다 자세한 정보는 PO.DAAC의 ftp 사이트(ftp://podaac.jpl.nasa.gov)에서 얻을 수 있다

4) QuikSCAT Science Data Product User's Manual, 2001, NASA/JPL

5) M.H. Freilich, P.I. "SeaWinds algorithm theoretical basis document", NASA/JPL

### 3. 자료 변환 및 분석

데이터는 Hierarchical Data Format (HDF) 형식을 가지며, 이를 변환하기 위한 프로그램들은 C, FORTRAN-77, Interactive Data Language (IDL)에서 사용가능하다. 본 연구에서는 IDL을 사용하였으며(표 3), 2000년 4월 28일의 데이터 중 남위 8° ~ 10°, 동경 200.125° 영역을 변환하여 예시하였다(그림 3).

LCN	LAT	SPD	U	V	SPD2	COUNT	TIME	FRCS	FLAG
200.12500	-9.87500	7.00	-6.77	-1.73	49.00	1	0.71562	0.211	0
200.12500	-9.62500	7.25	-6.99	-1.85	52.63	1	0.71568	0.261	0
200.12500	-9.37500	6.00	-5.98	-1.47	36.00	1	0.71570	0.678	0
200.12500	-9.12500	7.50	-7.50	-1.02	56.25	1	0.71576	0.611	0
200.12500	-8.87500	8.51	-8.31	-1.27	72.42	1	0.71735	1.070	0
200.12500	-8.62500	7.56	-7.56	-1.13	56.25	1	0.71989	0.262	0
200.12500	-8.37500	7.00	-7.00	-1.26	49.00	1	0.71992	0.074	0

그림 3. 변환된 데이터

데이터는 풍속의 스칼라 값과 제곱값, 위도, 경도 방향의 벡터 속도 u, v, 측정 빈도, 측정시각, 강우 발생도, Rain Flag를 포함한다(표 4).<sup>6)</sup>

표 3. 변환 프로그램

프로그램	변환 정보
ave vecmap.pro	그래픽화
read qscat3.pro	데이터
read qscat info.pro	데이터 정보

표 4. 데이터 형식

데이터	Scale	초기값	최소값	최대값	단위
풍속	0.01	0.00	0.00	50.00	m/s
풍속 U	0.01	0.00	-50.00	50.00	m/s
풍속 V	0.01	0.00	-50.00	50.00	m/s
제곱풍속	0.01	0.00	0.00	2500.00	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
측정빈도	1.00	0.00	0.00	1.00	갯수
측정시각	0.00002	0.00	0.00	1.00	시간비
강우발생도	0.001	0.00	0.00	1.00	n/a
Rain Flag	1.00	0.00	0.00	7.000	n/a

6) 강우 발생도와 Rain Flag는 측정오차의 발생 원인인 강우의 세기에 대한 데이터이다.

7) Erik L. Petersen "Wind Power Meteorology. Part1 : Climate and Turbulence" Wind Energy V.1 2-22, Riso National Laboratory

### 4. 결과 및 고찰

해상 풍력 자원의 평가를 위해 2000년 1월 1일부터 2003년 1월 18일, 약 3년의 데이터를 분석하였다. 분석 영역은 우리나라 근해를 포함하는 동경 125°~130.5°, 북위 32.25°~38°이다(그림 5).

측정 높이가 해면으로부터 10m인 데이터를 Power law model을 사용하여 60m 높이로 보정( $a=1/10$ ,  $u(z)=u(z_1) \times (z/z_1)^a$ )하였으며, 풍속 자료 분석은 예측 코드로서 가장 널리 사용되고 있는 덴마크 Risoe 연구소의 WASP(the Wind Atlas and Application Programs)을 이용하였다. 총 268개 지점에 대한 데이터 분석 결과는 제한된 지면을 고려하여 생략하였다.

풍속 빈도 분포의 수학적 모델 중 가장 적절하게 이용되고 있는 두 변수로 묘사되는 Weibull 분포 함수는 다음과 같다.

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

u는 풍속, A는 Scale parameter로 분포되는 풍속의 평균치와 관계하며, k는 Shape factor로 분포된 풍속의 편차와 관계하는 상수이다.

자연 상태의 풍속 빈도 분포는 Weibull 분포에 근접함이 실험적으로 검증이 되었으며, 따라서 오차율이 3%내 일 때 데이터의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.<sup>7)</sup> 분석 지점들의 평균풍속과 풍력 밀도의 평균 오차율은 각각 2.3%, 0.4%이다.

분석영역 내 동경 125.375°, 북위 32.375° 지점의 풍황 분석 결과를 예시하였다(표 5와 그림 4). 평균 풍속과 풍력밀도의 오차율이 각각 0.1%, 0.58% 이며, 실측 풍속 분포와 Weibull

분포의 근접성은 그림 4에서도 확인할 수 있다. 측정시각은 이동 방향에 따라 Ascend와 Descend로 나타내었다. 바람장미는 12방위(30°간격)의 상대적인 풍향 빈도를 나타낸다.

표 5. 풍향 분석 결과 (동경 125.375°, 북위 32.375°)

평균 풍속 (m/s)			풍력 밀도 (W/m <sup>2</sup> )		
측정값	weibull	오차율 [%]	측정값	weibull	오차율 [%]
9.12	9.11	0.10	855.4	850.4	0.58
Weibull 분포 상수		최소/최대 풍속 (m/s)		측정시각	
A (m/s)	k (-)	최소	최대	Ascend	Descend
10.5	2.11	0.0	28.0	21:10:22	09:35:26

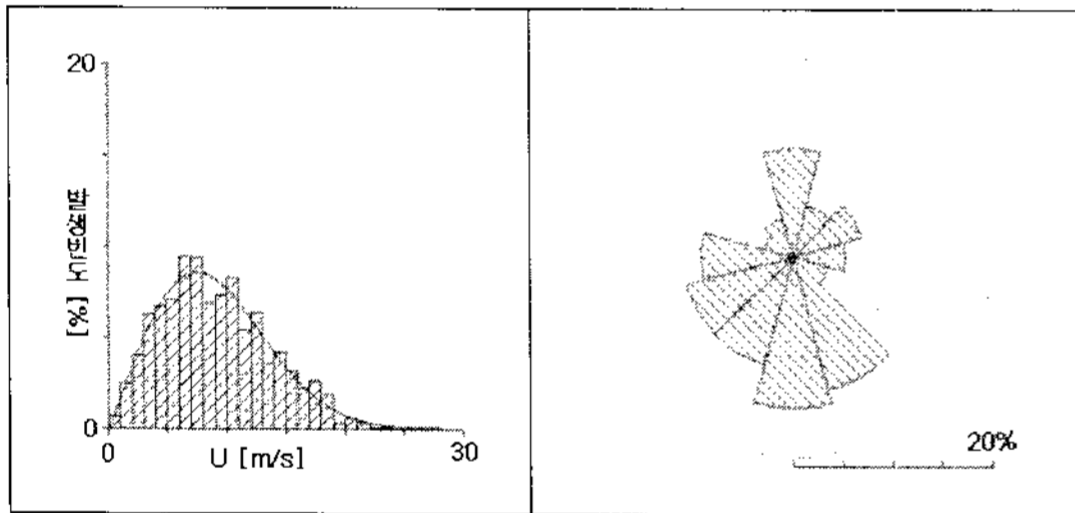


그림 4. 바람장미와 와이불 분포 (동경 125.375°, 북위 32.375°)

평균 속도 분포(그림 6)에서 남해와 제주도 부근이 상대적으로 높은 값을 가지며, 서해의 평균 풍속은 비교적 낮다. 이것은 동절기 계절풍이 한반도의 북서에서 불어오면서, 한반도 근해에서 기류의 상향으로 지표 풍속이 감소되었기 때문이며, 서해와 남해의 경계 부근에서는 한반도의 영향이 적어 감소 정도가 작은 것으로 판단된다.

또한, 북동쪽 태평양에서 불어오는 바람이나 하절기에 남서쪽으로부터의 바람의 경우, 우리나라와 일본의 사이를 빠져나가고 육지에서 상향되었던 북서풍이 남해의 바다를 만나 다시 하향하는 현상 등으로 인해 남해의 평균 풍속이 높아진 것으로

판단된다. 풍력자원의 또 다른 척도인 풍력 밀도(그림 7)와 A(그림 8)의 분포도 유사한 형태를 가진다.

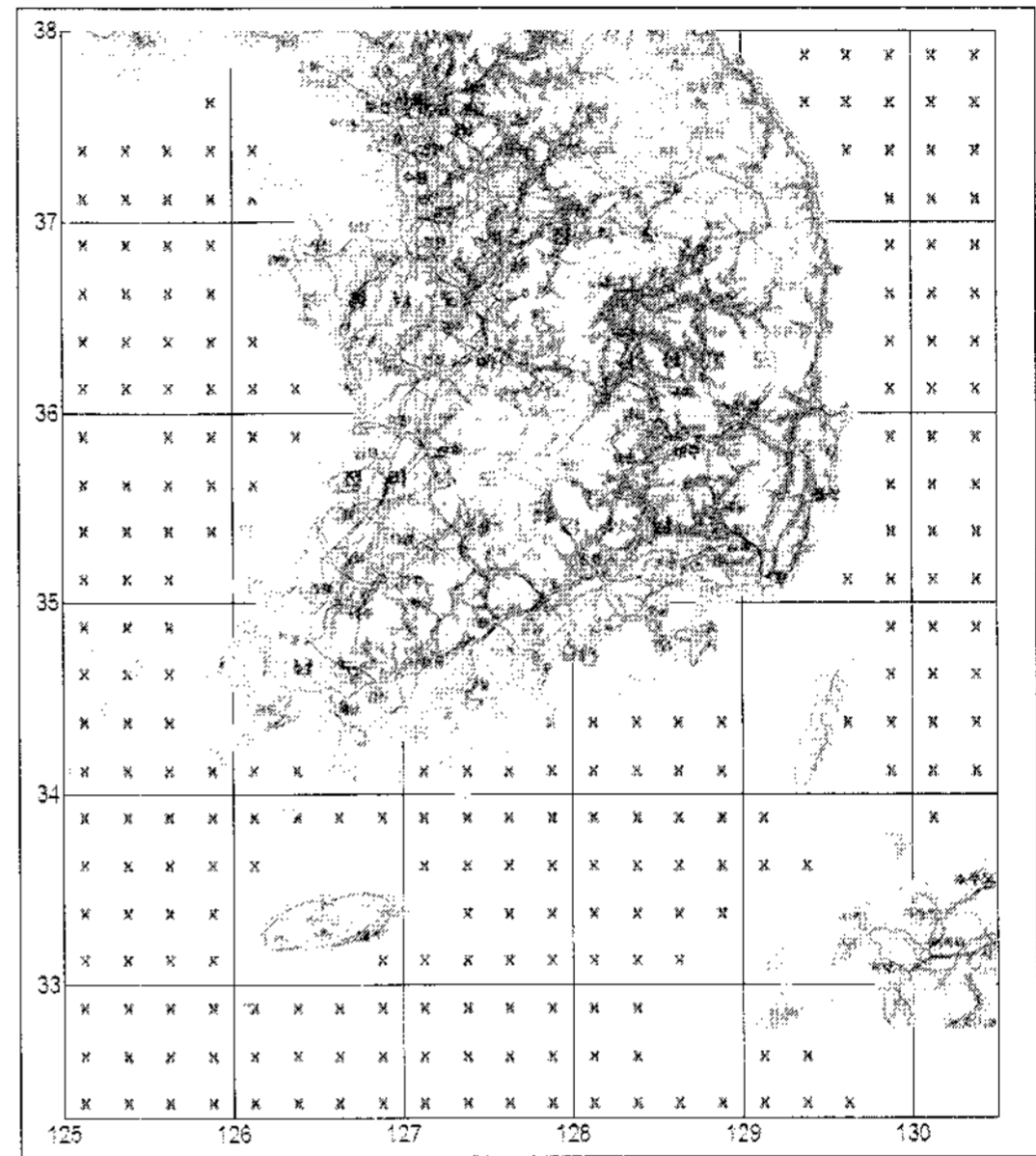


그림 5. 우리나라 근해의 측정 지점

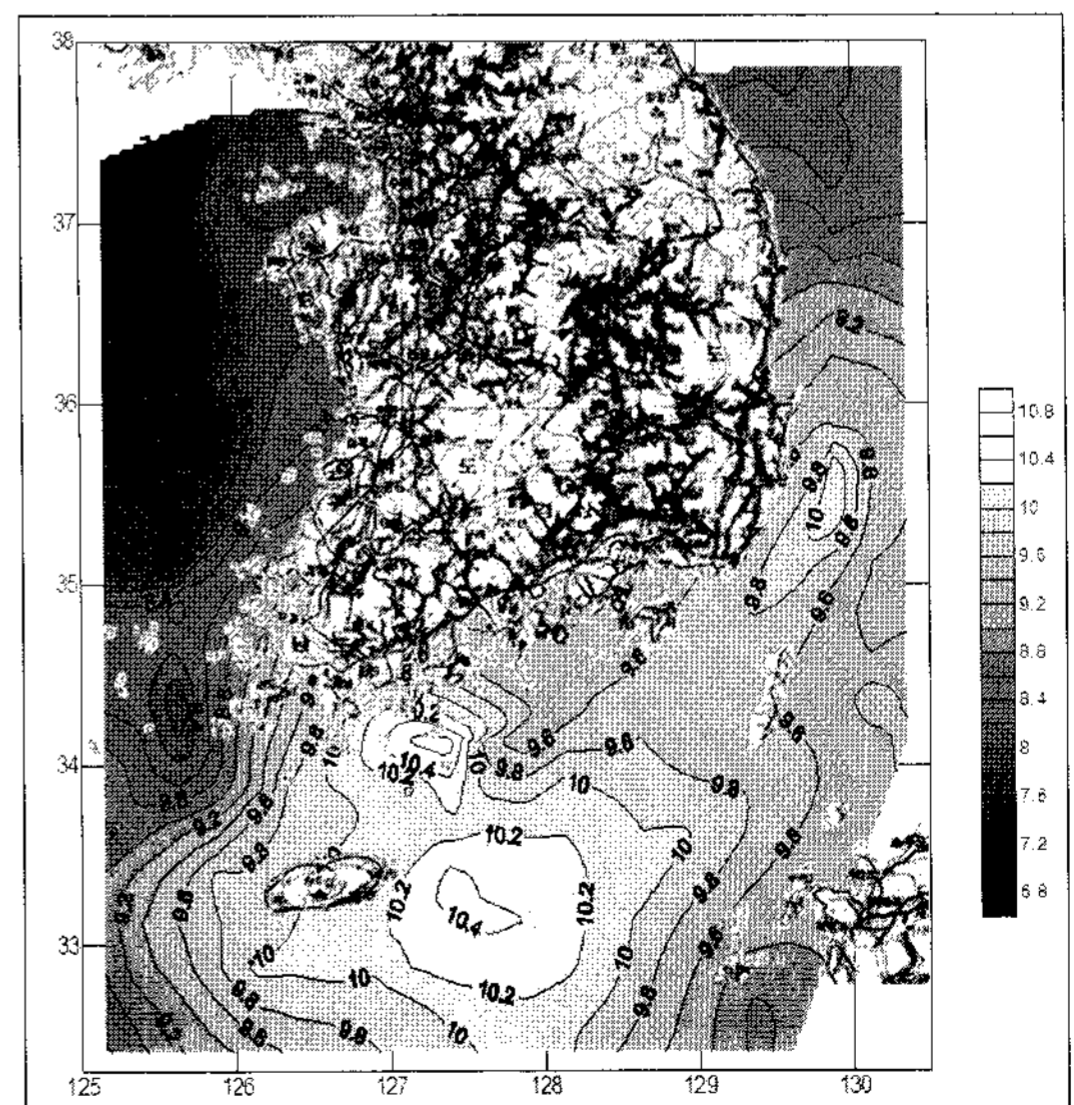


그림 6. 평균 풍속 [m/s]

k의 분포는 서해에서 상대적으로 낮은 값을 가지는데, 높은 풍속구간의 빈도가 낮고 그 분포가



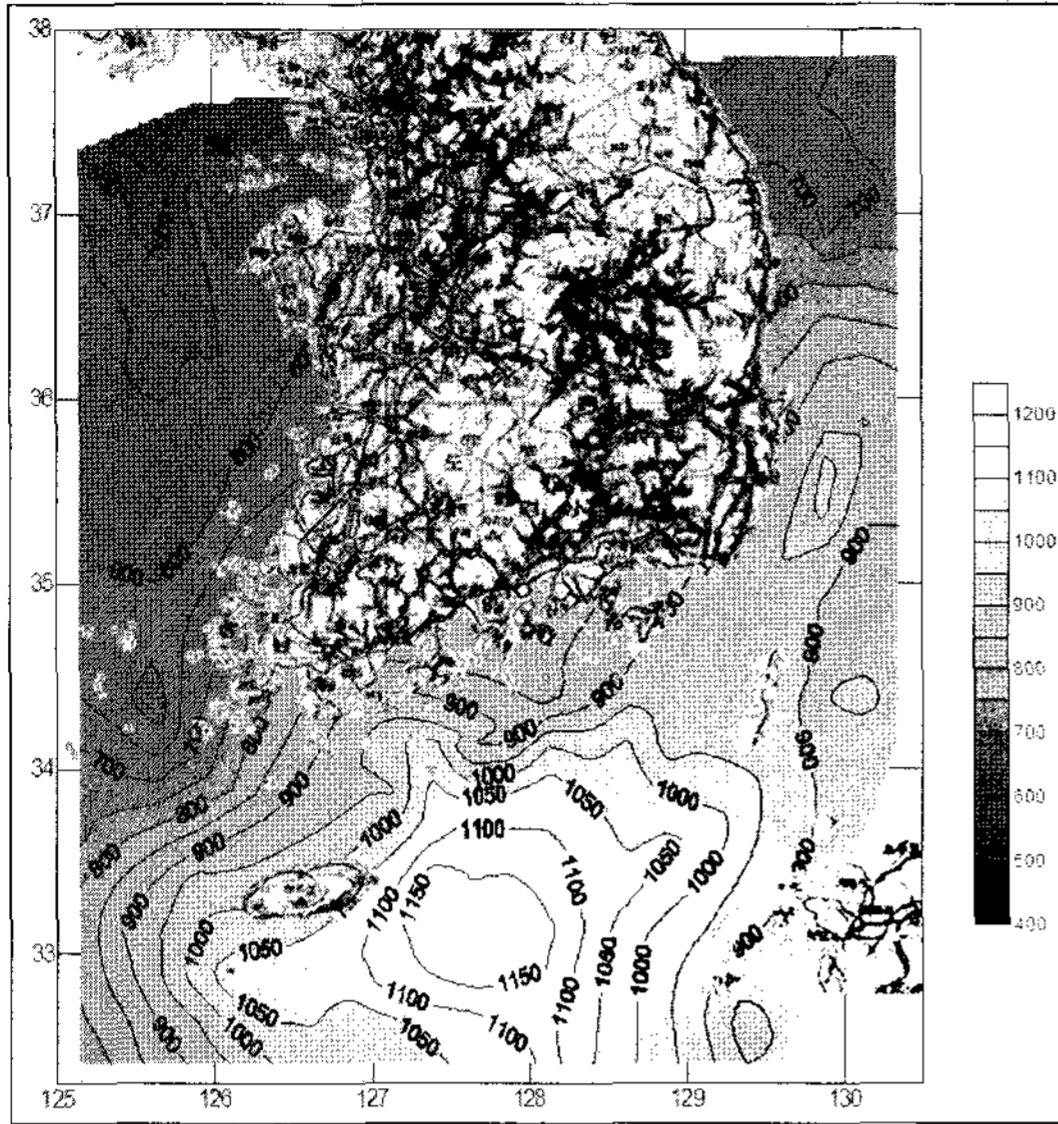


그림 7. 풍력 밀도 ( $W/m^2$ )

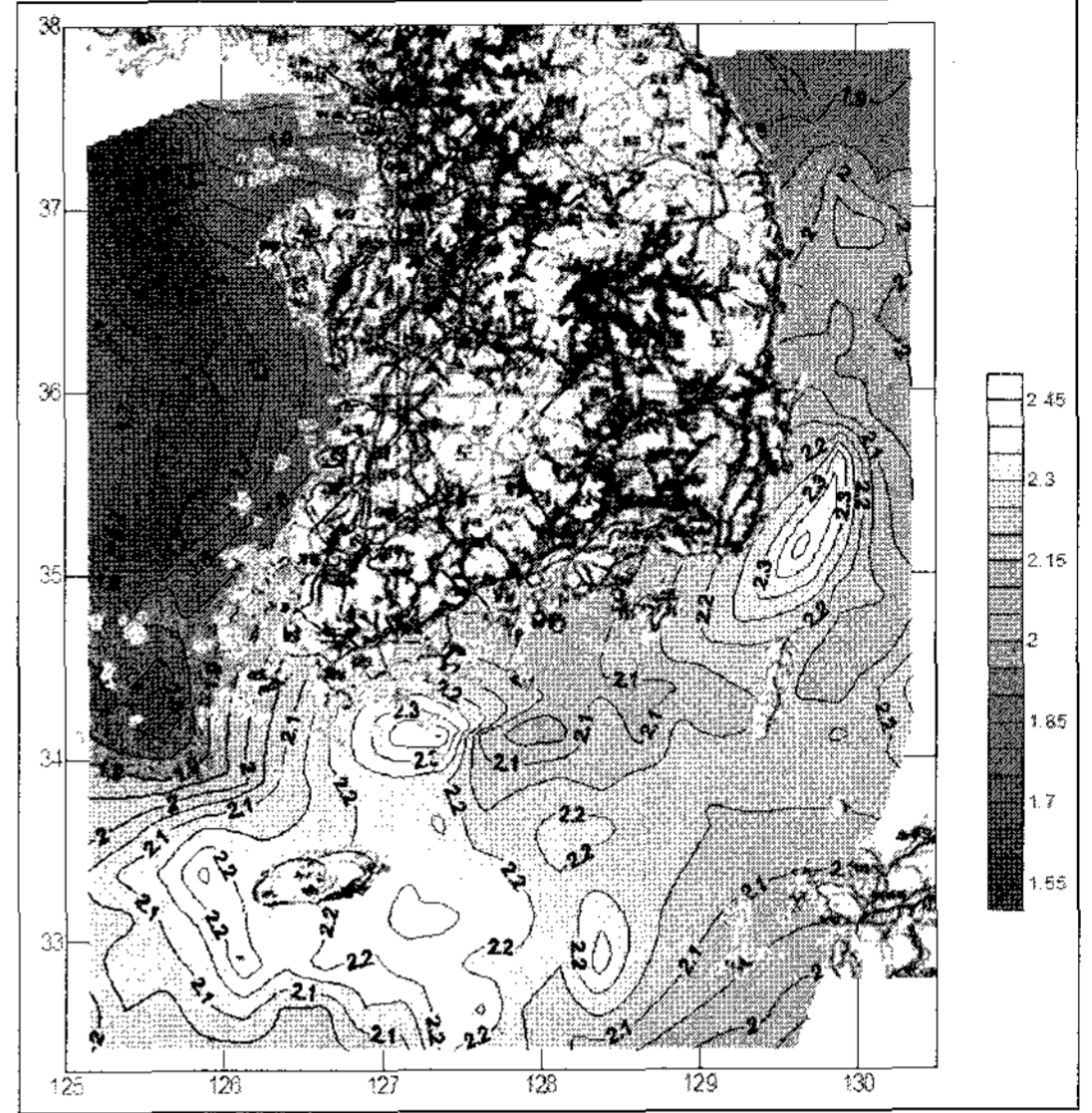


그림 9. Shape factor k [-]

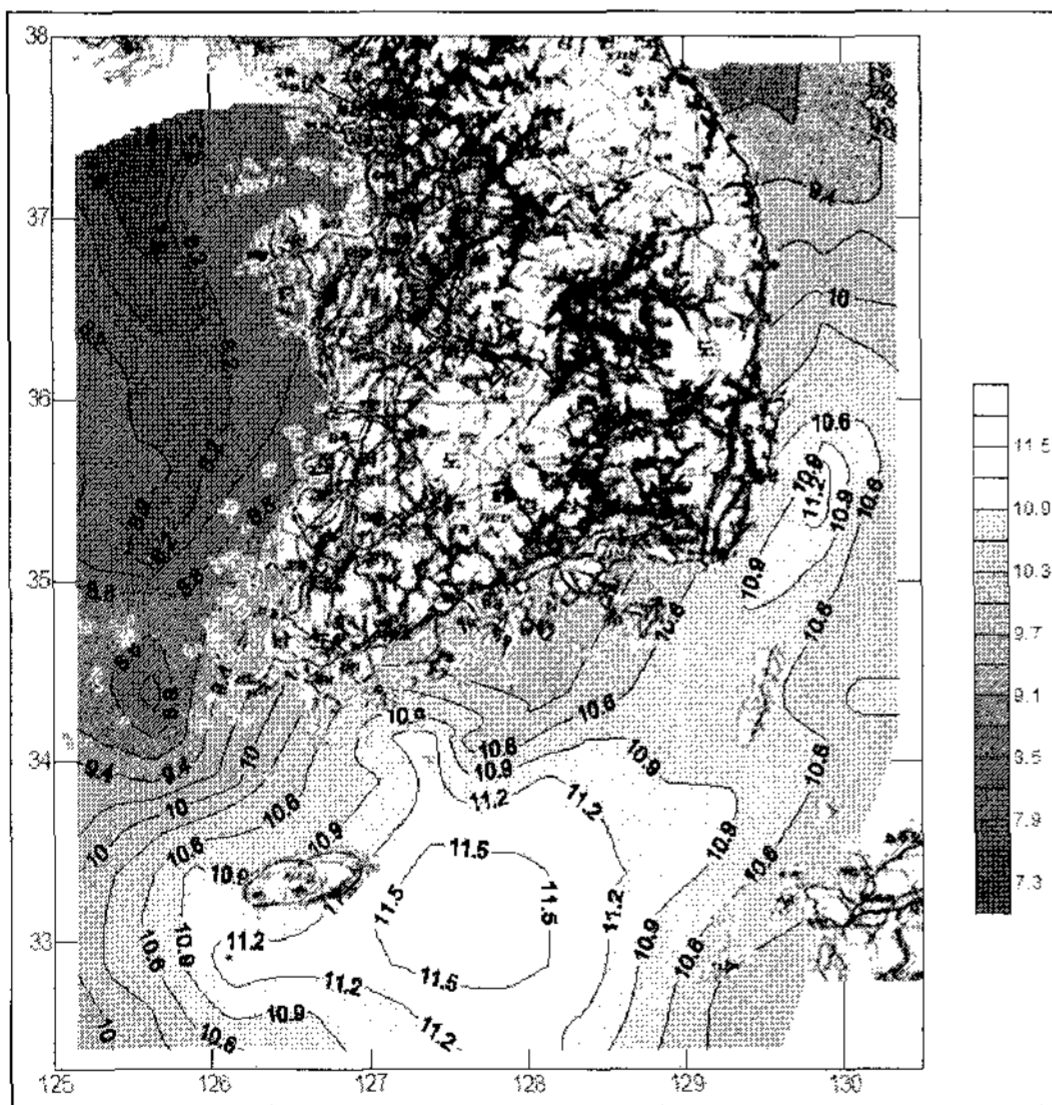


그림 8. Scale parameter A (m/s)

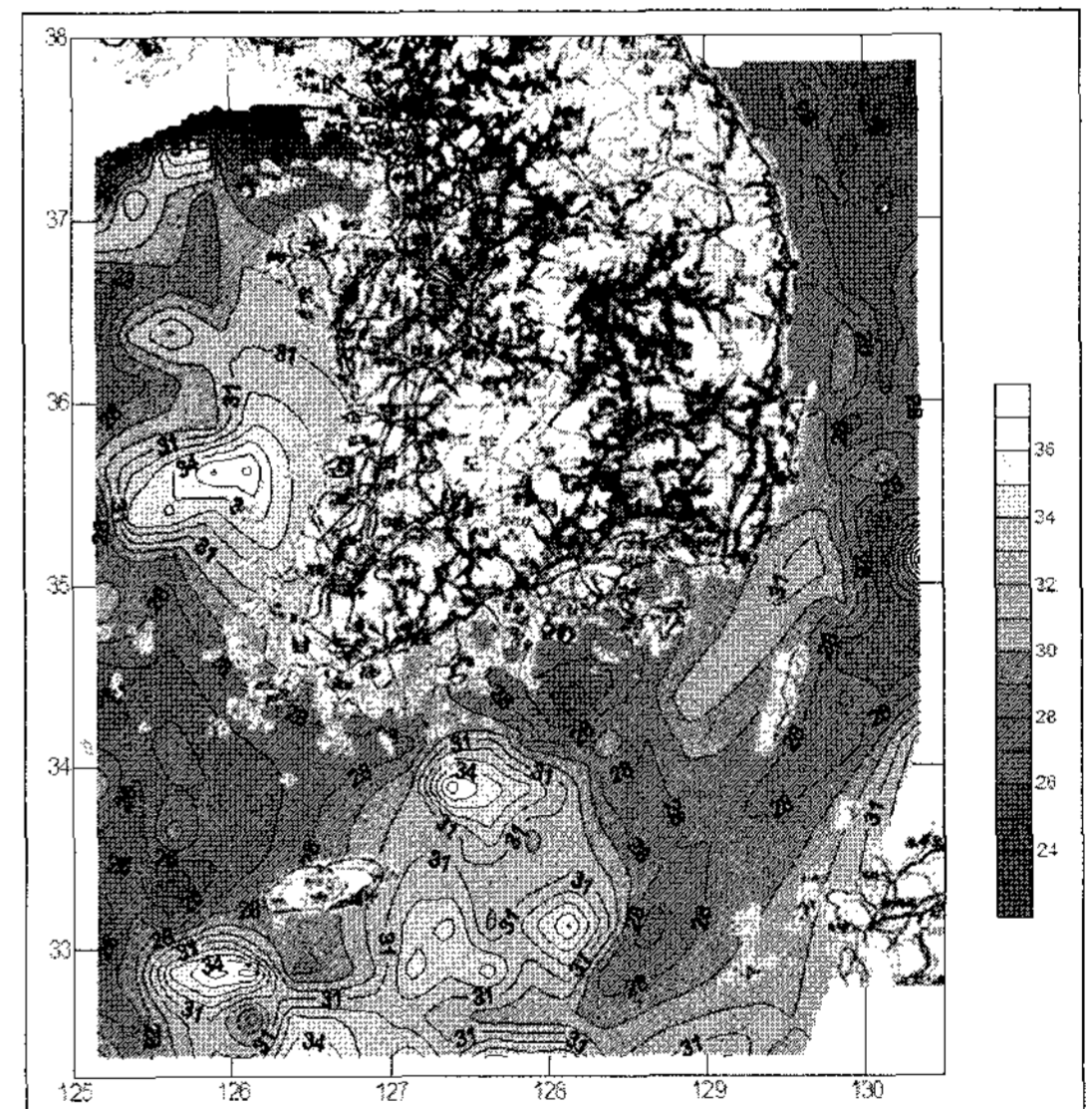


그림 10. 최대 속도 (m/s)

집중되는 형태를 가지는 것을 의미한다(그림 9).

최대 속도의 분포(그림 10)에서, 남해의 동경 127.375°, 북위 33.875°지점에서 36.9m/s로 최대값을, 서해의 동경 125.875°, 북위 37.625° 지점이 22.1m/s로 최소값을 가진다.

## 5. 결론

인공위성의 측정주기는 약 1일 2회의 diurnal scale로서 Van der Hoven Spectrum의 synoptic scale만을 고려한 것으로 그 보다 높은

주기의 풍력특성을 알 수는 없다. 또한 국지적인 풍황 특성을 알 수는 없다. 그러나 전체적인 해상 풍력 자원 평가를 위해 현재로서는 가장 신빙성이 있는자료이며 이를 분석한 결과 한반도 부근의 해상 풍력 자원은 주로 남해안과 남해안에 접한 서해, 동해 남부에 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

서해해역은 풍력에너지 밀도가  $600 \text{ W/m}^2$ 이하로서 아직까지는 경제성 있는 해상 풍력발전 단지가 건설될 가능성이 없으며 동해 남부 쪽은  $900 \text{ W/m}^2$ 이상 지역이 분포되어 있어 풍황은 대단히 우수하지만 이안거리가 커지면 수심이 너무 깊어서 역시 경제성을 확보하기 어렵다. 고흥반도와 진도, 조도를 잇는 남쪽 해역은 풍력에너지 밀도가  $800 \sim 900 \text{ W/m}^2$ 로서 우수한 풍력자원을 가지고 있으며 수심도 20m 내외의 천해지역이어서 경제성이 뛰어나므로 우리나라의 초대형 해상 풍력 발전 단지를 건설하기에 유망한 지역이다. 또한 제주도 지역은 수심의 급격한 변동으로 인해 대형 해상 풍력발전 단지 건설은 어려움이겠지만 중, 소규모의 경제적인 해상풍력발전단지 건설은 충분히 가능하다.

향후 우리나라의 대체에너지 자원 확보를 위해 해상풍력 발전 유망지역의 정밀 풍황, 수심, 파랑, 해저 지질 등에 대한 보다 정밀하고 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 공공기술연구회가 지원한 "해상풍력 발전 시범사업기획연구"의 일부이며 연구에 도움을 주신 여러 관계자 분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hyo-Suk Lim, Gi-Hyuk Choi, Han-Dol Kim: Characteristics of Typhoon Jelawat Observed by OSMI, TRMM/PR and QuikSCAT, Journal of the Korean Society of Remote Sensing V.16 No.4, KARI, 2000.
2. QuikSCAT Science Data Product User's Manual, NASA/JPL, 2001.
3. Helmut P. Frank, Erik L. Petersen: Calculations on the Wind Climate in Northern Finland : the Importance of Inversions and Roughness Variations during the Seasons", Wind Energy V.2 113-123, Risø, Denmark, 1999.
4. Erik L. Petersen, Niels G. Mortensen, Lars Landberg: Wind Power Meteorology. Part1 : Climate and Turbulence" Wind Energy V.1 2-22, Risø, 1998.
5. Dunbar, R.S., S.V. Hsiao : Science Algorithm Specifications for the NASA Scatterometer Project" JPL D-5610 (597-521), Vol. 1 and 2 Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 1988.
6. M.H. Freilich, P.I.: SeaWinds algorithm theoretical basis document, NASA/JPL
7. WIND FORCE 12, A blue print to achieve 12 percent of the world's electricity from wind power by 2020, EWEA and Greenpeace, 2002.
8. 해상 풍력발전 시범단지 기획에 관한 연구, 한국에너지기술연구원, 2003.