

한반도 바람자원의 시공간적 분포

김도우 · 변희룡*

부경대학교 환경대기과학과

(2008년 6월 11일 접수; 2008년 8월 5일 승인)

Spatial and temporal distribution of Wind Resources over Korea

Do-Woo Kim and Hi-Ryong Byun*

Dept. of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University

(Manuscript received 11 June 2008; in final form 5 August 2008)

Abstract

In this study, we analyzed the spatial and temporal distribution of wind resources over Korea based on hourly observational data recorded over a period of 5 years from 457 stations belonging to Korea Meteorological Administration (KMA). The surface and 850 hPa wind data obtained from the Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS) and the Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) over a period of 1 year are used as supplementary data sources. Wind speed is generally high over seashores, mountains, and islands. In 62 (13.5%) stations, mean wind speeds for 5 years are greater than 3 m s^{-1} . The effects of seasonal wind, land-sea breeze, and mountain-valley winds on wind resources over Korea are evaluated as follows: First, wind is weak during summer, particularly over the Sobaek Mountains. However, over the coastal region of the Gyeongnam-province, strong southwesterly winds are observed during summer owing to monsoon currents. Second, the wind speed decreases during night-time, particularly over the west coast, where the direction of the land breeze is opposite to that of the large-scale westerlies. Third, winds are not always strong over seashores and highly elevated areas. The wind speed is weaker over the seashore of the Gyeonggi-province than over the other seashores. High wind speed has been observed only at 5 stations out of the 22 high-altitude stations. Detailed information on the wind resources conditions at the 21 stations (15 inland stations and 6 island stations) with high wind speed in Korea, such as the mean wind speed, frequency of wind speed available (WSA) for electricity generation, shape and scale parameters of Weibull distribution, constancy of wind direction, and wind power density (WPD), have also been provided. Among total stations in Korea, the best possible wind resources for electricity generation are available at Gosan in Jeju Island (mean wind speed: 7.77 m s^{-1} , WSA: 92.6%, WPD: 683.9 W m^{-2}) and at Mt. Gudeok in Busan (mean wind speed: 5.66 m s^{-1} , WSA: 91.0%, WPD: 215.7 W m^{-2}).

Key words: Wind resources, Wind power density, Weibull distribution, Seasonal wind, Land-sea breeze, Mountain-valley winds

1. 서론

신재생 에너지 개발의 필요성은 기후협약에 의한 온실 가스 규제와 고유가시대의 도래로 인해 더욱 절실해

지고 있다. 재생 에너지 중 가장 급속히 발전하는 분야는 풍력에너지이며(Bourillon, 1999), 풍황이 좋은 지역에서의 풍력발전의 경제성은 환경비용까지 포함하였을 경우 원자력 발전, 화력 발전에 비해 결코 뒤지지 않는다(Ian, 1996). 전 세계적으로 총 발전용량이 최근 5년 동안 연평균 35%의 증가율을 보여 왔으며, 유럽의 경우 전체 전력수요의 2.4%(60 TWh)를 풍력발전으로 충당하고 있다. 풍력에너지 개발의 선진국인 영국은 2010년까지 전체 발전량의 10%, 덴마크는 2030년까지 40%를 각각 풍력에너지로 대체할 계획이다. 국내 풍력 잠재량은 국내 총 발전량의 2.3배인 연간 660

*Corresponding Author: Prof. Hi-Ryong Byun, Dept. of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 599-1 Daeyon 3-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Republic of Korea.
Phone: +82-51-620-6640, fax: +82-51-620-6640
E-mail: hrbyun@pknu.ac.kr

TWh로 추산되며, 이중 5% 개발 시에는 국내 총 발전량의 11.6%를 충당 할 수 있다(한국에너지기술연구원, 2003). 하지만 국내 풍력 개발 현황은 총 시설용량이 174 MW이고, 향후 건설될 시설용량을 합하여도 국내 총 발전량의 0.1%도 채 되지 않는다. 따라서 이 분야의 계속적 연구 개발이 필요시 되고 있다. 현재 운행 중인, 그리고 건설 예정인 풍력발전기 현황을 Fig. 1에 제시하였다.

풍력발전기 설립요건에는 입지지역의 풍속과 풍향 조건, 법적 소유권 문제, 토양의 견고성, 자재 및 중장비의 조달 가능성, 인근 한전선로의 존재, 지역주민의 반응도 등 여러 요인들이 존재한다. 그 중 바람의 조건이 최우선이며, 나머지 요인은 인력으로 해결이 가능하므로 본 연구에서는 국내 풍향 조사에 초점을 두었다.

현재까지 진행된 풍력발전 부지 선정을 위한 풍향 조사 연구들은 대부분 기상청 산하 64개 지점의 관측소 데이터를 이용하거나(박경호 등, 1990), 객관적 근거 없이 선택된 특정 지역에서 관측한 풍속데이터를 이용하였다(한국동력자원연구소, 1989; 한국동력자원연구소, 1990; 한국에너지기술연구원, 1997; 한국에너지기술연구원, 2005). 이들이 사용한 64개 이하의 관측지점 자료는 전국적인 풍향을 묘사하기에 공간 해상도가 매우 부족하다. 구체적으로 한국에너지기술연구원(2005)은 전국에 걸쳐 15개 자동 관측 장비를 설치해 바람을

관측하였으나, 본 연구 결과 그 중 절반에 해당하는 지점들이 평균적인 약풍 지역 내에 위치함을 발견하였다. 풍력발전의 가능성을 타진하기 위해 풍력발전 후보지에 대한 국지적인 관측이 필요하지만, 그보다 전국적인 풍향 조사가 선행되어야 차후 국지적 바람 연구에서 시간과 비용의 절감, 연구의 객관성과 효율성 증대를 기대할 수 있다. 가용 바람 관측자료를 최대한 수집하여 500개 이상의 지점 자료를 확보한 연구로는 오직 김현구 등(2005)이 있다. 하지만 그들의 주된 연구 목적은 QuikSCAT에 의해 측정된 해상풍 자료를 이용한 해상 풍력 자원의 평가이어서, 내륙의 풍향 정보로써 단지 5년(1999~2003) 평균풍속의 분포만을 제시하였다. 이에 최근 기상청에서는 보다 자세하고 편리한 풍향 자료 제공을 위해 국내 최초로 고해상도 한반도 바람지도를 작성 중에 있다. 하지만 아직 2005년 한해의 자료만을 사용하여 개발 중이며 공개되지는 않았다(이은정 등, 2008).

본 연구는 5년간의 기상청 산하 457개 지점의 매시 바람 관측자료를 바탕으로 좀 더 세밀한 바람지도를 제공하고, 바람 자원의 시공간적 특성을 분석하고자 한다. 한반도에 존재하는 모든 바람 관측자료를 사용하더라도 중규모적 지형효과에 따른 바람 분포를 나타내기에는 한계가 있다(김현구 등, 2005). 이를 극복하기 위해 6 km 해상도를 가지는 1년간의 KLAPS 바람 분석 자료를 보조 자료로써 사용하였다.

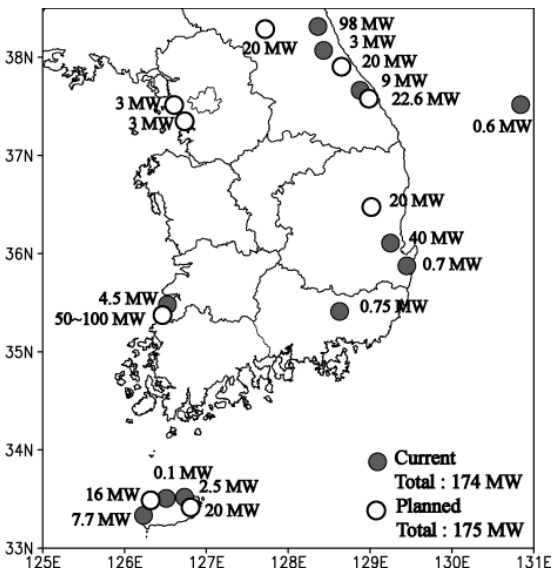


Fig. 1. Installed (closed circle) and planned (open circle) wind power capacity in Korea (From Korea Institute of Energy Research; <http://jeju.kier.re.kr>).

2. 자료 및 분석 방법

한반도 내 바람 분포를 위해 2000~2004년 동안 기상청 산하 457개 지점의 매시 관측 풍속, 풍향 자료를 사용하였다. 또한, 보조 자료로써 2004년 6월1일부터 2005년 5월31일까지의 Korea Local Analysis and Prediction System (KLAPS)의 지표 바람 분석자료와 Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS)의 850hPa 바람 분석자료를 이용하였다. 이는 각각 3시간과 6 km × 6 km, 12시간과 30 km × 30 km의 시공간적 해상도를 가진다.

풍향의 지속성(r)은 아래 식 1을 이용하여 계산하였다(Sopian *et al.*, 1995).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i}{n} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i}{n} \right)^2 \quad (1)$$

(0 ≤ r ≤ 1)

n은 관측 데이터의 수이며, θ 는 풍향을 의미한다. 단, 457개 지점 중 79개의 유인관측소에서는 풍향이 22.5° (16방위) 단위로 관측되고, 378개의 무인관측소는 1° 단위로 관측된다. 따라서 풍향의 지속성 계산 시 데이터의 통일성을 위해 무인관측소의 풍향데이터를 22.5° 단위로 변환하여 사용하였다.

여러 수학적 모델 중 풍속 빈도 분포에 가장 적합한 Weibull 분포 함수(식 2)를 이용하여 풍속별 출현 빈도를 구하였다(e.g. Persaud *et al.*, 1999; Ulgen and Hepbasli, 2002). 이 함수는 풍속 빈도 분포의 왜도(Skewness)를 정확히 어림하는 장점이 있다(Celik, 2003).

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

v는 풍속, c는 풍속분포의 평균치와 관계되는 등급계수(Scale parameter), k는 풍속분포 편차의 크기를 나타내는 형상계수(Shape parameter)이다. 각각의 계수는 평균풍속(\bar{v})과 분산(σ^2)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다(식 3, 4). Γ 는 감마함수이다.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (3)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad (4)$$

풍력밀도의 어림은 평균풍속과 더불어 풍력 자원을 평가하는데 있어 유용한 방법이다. 단위 면적당의 에너지($W m^{-2}$)로 측정되는 풍력밀도(식 5)는 그 지점에서 얼마만큼의 에너지가 풍차에 의해 전환 될 수 있는지를 나타낸다.

$$Wind\ power\ density = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (5)$$

Table 1. Classes of wind power density at 10m.

Wind Power Class	Wind Power Density ($W m^{-2}$)
1	<100
2	100 - 150
3	150 - 200
4	200 - 250
5	250 - 300
6	300 - 400
7	>400

여기서 ρ 는 공기의 밀도이고 모든 지점에서 1.225 $kg m^{-3}$ 으로 가정하였다. 이렇게 구해진 풍력밀도에 따라 풍력 등급은 7단계로 구분된다(Table 1).

3. 결과 및 분석

3.1 평균 분포

5년 동안의 457개 지점 관측데이터와 1년 동안의 KLAPS 분석자료를 이용하여 한반도 평균풍속 분포를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2a에서 원의 크기는 평균 풍속과 비례하며, 3 $m s^{-1}$ 이상을 검정 원으로 표시하였다. 또한 300 m 이상의 지형을 음영으로 나타내었다. 평균풍속의 457개 지점 평균은 1.94 $m s^{-1}$ 이며, 평균풍속이 3 $m s^{-1}$ 이상인 지점의 수는 총 62개(13.5%)이다. 그림에 제시하진 않았지만 5년간 연평균 풍속의 표준편차의 457개 지점 평균은 0.17 $m s^{-1}$ 이며, 평균풍속이 3 $m s^{-1}$ 이상의 62개 지점들 중 5개 지점(미시령 1.46 $m s^{-1}$, 군산 0.93 $m s^{-1}$, 목포 0.57 $m s^{-1}$, 우도 0.56 $m s^{-1}$, 고산 0.56 $m s^{-1}$) 만이 연평균 풍속의 표준편차가 0.5 $m s^{-1}$ 이상이다.

Fig. 2a를 통해 풍속이 강한 지점들이 해안, 도서, 그리고 일부 산악지역에 위치함을 알 수 있다. 해안지방 중 3 $m s^{-1}$ 이상의 지점들은 주로 전라남도의 반도지역들 부터 경상북도 해안까지에 위치하며, 호미곶(4.64 $m s^{-1}$), 여수(4.62 $m s^{-1}$), 도화(4.48 $m s^{-1}$), 죽변(4.39 $m s^{-1}$), 목포(4.03 $m s^{-1}$)에서 4 $m s^{-1}$ 이상의 강한 평균풍속이 관측되었다. 경기도 해안 지역은 3 $m s^{-1}$ 이상의 지점이 없어 비교적 바람이 약함이 나타난다. 이는 KLAPS 분석장에서도 확인할 수 있다(Fig. 2b). 경기만의 지리적 특성으로 인해 정 서풍을 제외한 바람은 육지를 거쳐 경기도 해안에 다다른다. 따라서 육지 마찰로 인한 풍속 감소가 이 지역 약풍의 원인이다.

해발 고도 500 m 이상의 산악 지역에 위치한 관측소는 총 22개이다. 그 중 3 $m s^{-1}$ 이상의 평균풍속은 구덕산(5.66 $m s^{-1}$, 고도: 517 m), 미시령(5.15 $m s^{-1}$, 고도: 771 m), 대관령(4.20 $m s^{-1}$, 고도: 842 m), 계룡산(3.83 $m s^{-1}$, 고도: 835 m), 진부령(3.33 $m s^{-1}$, 고도: 620 m)의 5개 지점에서만 관측되었다. 부산의 구덕산 지점은 이들 중 가장 낮은 해발고도에 위치함에도 불구하고 가장 높은 풍속을 보인다. 관측자료와 달리 KLAPS 분석 자료에서는 산악 고지에 3 $m s^{-1}$ 이상의 강풍이 분포하고 있음이 나타난다. 이를 통해 산악 지역의 풍향을 모

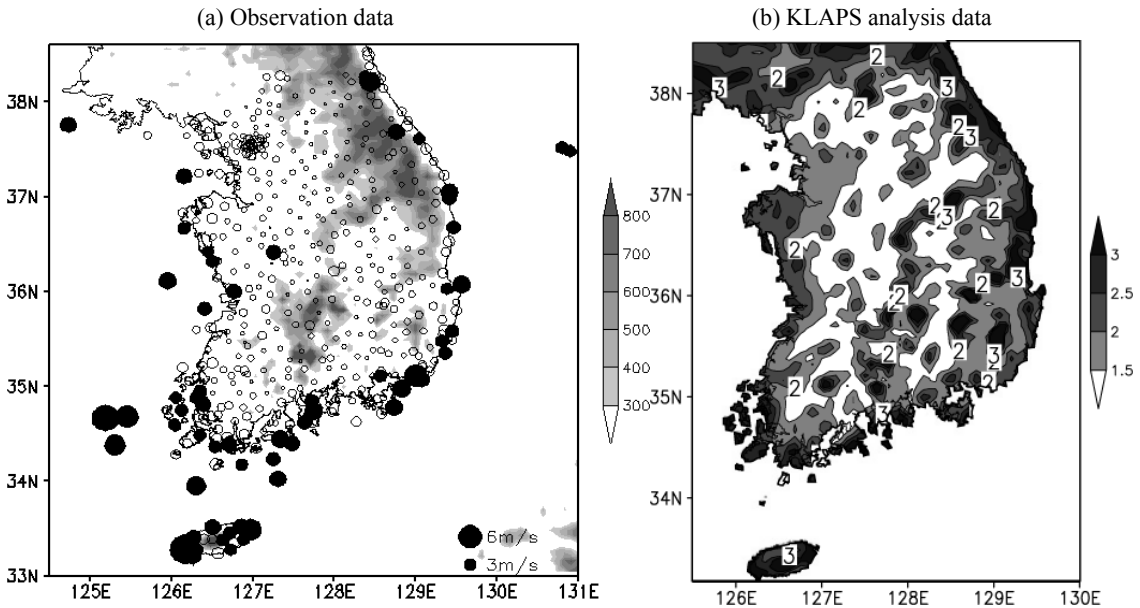


Fig. 2. Distribution of mean wind speed. (a) Observation data recorded at 475 stations. Size of the circle is proportional to wind speed, and wind speeds higher than 3 m s^{-1} are highlighted by a closed circle. Orography higher than 300 m is shaded. (b) KLAPS analysis data. Area where the wind speed is higher than 1.5 m s^{-1} is shaded.

사하기에는 관측지점의 수가 부족하다는 것을 알 수 있다.

도서 지역에 위치한 관측소는 총 61개이며, 그 중 32개 지점에서 3 m s^{-1} 이상의 평균풍속이 관측되었다. 제주도 고산 지점(7.7 m s^{-1})에서 풍속이 가장 강하며, 제주도에 위치한 15개 지점 평균 풍속은 3.6 m s^{-1} 이다. 그 밖에 홍도(6.82 m s^{-1}), 흑산도(5.63 m s^{-1}), 우도(5.63 m s^{-1}), 하태도(5.31 m s^{-1}), 추자도(4.86 m s^{-1}), 가덕도(4.61 m s^{-1}), 서이말(4.51 m s^{-1})에서 4.5 m s^{-1} 이상의 풍속이 나타났다. 도서 지역 역시 경기도 연해에 위치한 11개 지점 중 단지 1개 지점(덕적도)에서만 평균풍속이 3 m s^{-1} 이상이다.

3.2 주간 강풍과 야간 약풍

바람은 태양의 일사에 의한 기온변화에 따라 하루 중 변화가 뚜렷하게 나타난다. 전체 457개 지점, 해안 지역에 위치하는 81개 지점, 500 m 이상의 고지에 위치하는 22개 지점, 도서 지역에 위치하는 61개 지점 평균 풍속의 하루 중 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 한반도는 평균적으로 오후 3시경에 평균풍속이 2.7 m s^{-1} 로 바람이 가장 강하며, 일몰 후부터 일출 전까지 약 1.5 m s^{-1} 의 상대적으로 약한 바람이 유지된다. 도서 지역의 평균풍속은 전체 평균보다 하루 내내 1 m s^{-1} (주간)~ 1.5

m s^{-1} (야간) 더 강하며, 일몰 후에도 약 3 m s^{-1} 의 풍속이 유지된다. 해안 지역의 평균풍속은 전체 평균풍속보다 하루 내내 약 0.5 m s^{-1} 정도 강하다. 산악 지역의 바람은 낮 동안 평균풍속과 비슷하지만, 일몰 후에는 평균보다 강한 풍속이 유지되는 특징이 있다. 이는 산악 지역 강풍을 정확히 묘사할 만큼 관측소의 수가 많지

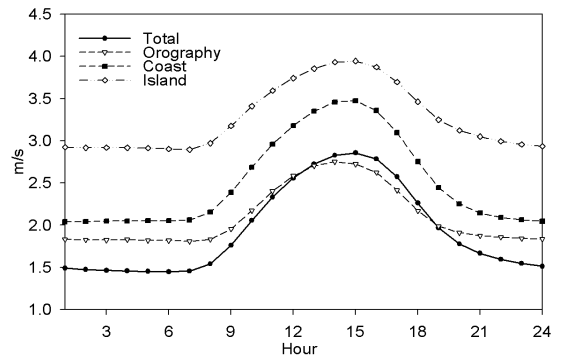


Fig. 3. Diurnal variation of mean wind speed at all the stations (457). Solid line denotes the average wind speed over all the stations. Dashed line with open circles indicates the average over island stations (61), that with closed squares indicates the average over coastal stations (81), and that with open reversed triangles indicates the average over stations located at a level higher than 500 m (22).

않음에도 불구하고 야간 산풍의 영향은 뚜렷이 나타남을 보여준다.

관측자료와 KLAPS 분석 자료를 이용한 낮(09시~21시)과 밤(22시~08시) 동안의 평균풍속 분포를 Fig. 4에 각각 나타내었다. 관측 데이터에서 낮 동안 3 m s^{-1} 이상의 지점들이 해안 지역, 도서 지역, 일부 산악 지역의 총 85개 지점(18.6%)에서 나타난다. 하지만 밤 동안은 그 수가 급감하여 거의 절반인 43개 지점(9.4%)에서만 나타난다. KLAPS 분석 자료에서도 밤 동안 산악과 해안 지역을 제외한 내륙 평야 지역에 풍

속이 급감함이 잘 나타난다. 한편, 서해안 지역에서도 야간 약풍이 비교적 뚜렷하다. 관측 자료에서 서해안 지역은 도서 지역을 제외하면 단지 3개 지점(보령항: 3.14 m s^{-1} , 군산: 3.19 m s^{-1} , 목포: 3.34 m s^{-1})에서 3 m s^{-1} 이상의 평균풍속이 나타나며, KLAPS 분석자료에서도 2 m s^{-1} 이상의 영역이 서해안에서는 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 편서풍과 육풍의 방향이 반대이며, 산악 지형이 거의 없어 산풍의 영향 또한 없기 때문이라 판단된다.

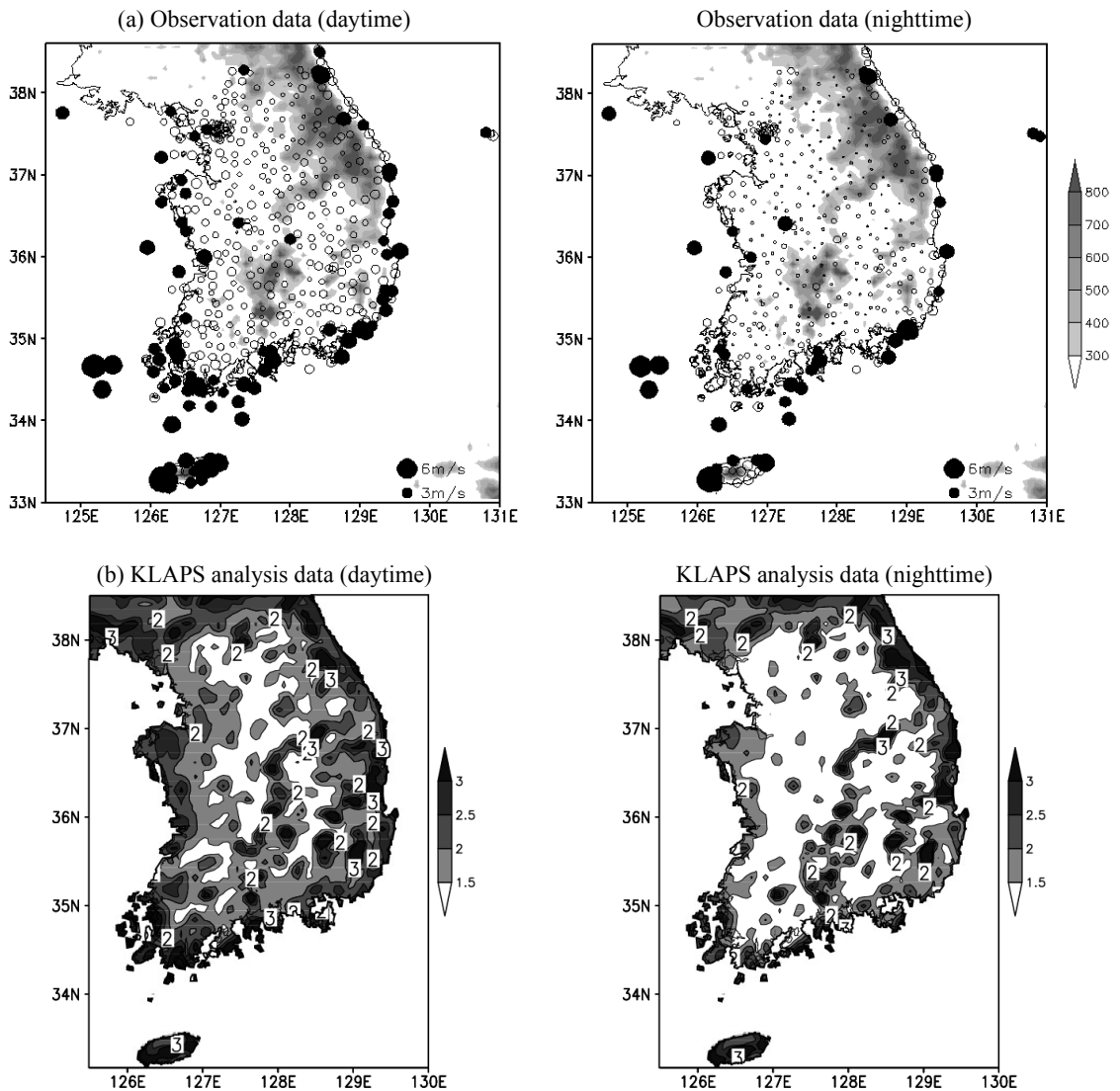


Fig. 4. Similar to Fig. 2, except for mean wind speed during daytime (09~20 LST) and night-time (21~08 LST).

3.3 겨울 강풍과 여름 약풍

한반도는 지리적으로 중위도 대륙과 대양사이에 위치함으로써 바람의 계절적 변화가 뚜렷하게 나타난다. 457개 지점의 월별 평균풍속과 평균 풍향의 지속성을 Fig. 5에 제시하였다. 풍속은 겨울에서 초봄까지 강하고, 여름부터 초가을까지 약하다. 풍향의 지속성은 1월에 가장 높고, 봄부터 급감하기 시작하여 여름을 거쳐 초가을까지 낮다. 따라서 겨울은 강한 풍속과 더불어 풍향의 지속성이 높아 풍력 발전이 용이하나, 여름은 약한 풍속과 함께 풍향의 지속성도 낮음을 고려해야 한다.

관측자료와 KLAPS 분석자료를 이용한 겨울(DJF)과 여름(JJA)의 풍속 분포를 Fig. 6에 각각 제시하였다. 앞선 시계열과 유사하게 평균풍속 3 m s^{-1} 이상의 강풍 지점이 겨울에 89개(19.5%)로 다수 존재한다. 참고로 봄은 72개(15.8%) 존재한다. 하지만 여름에 이르러 급감하여 단지 35개 지점(7.7%)에서만 나타난다. 이는 겨울의 절반에도 미치지 못하는 수이다. 가을 역시 전체적인 약풍이 지배적이며 52개 지점(11.4%)에서 3 m s^{-1} 이상의 평균풍속이 관측된다(그림 생략). 겨울과 여름의 분포도를 비교하였을 때, 경남 해안에는 여름에도 3 m s^{-1} 이상의 평균풍속 지점이 7개(서이말 5.15 m s^{-1} , 구덕산(부산) 4.68 m s^{-1} , 가덕도 4.46 m s^{-1} , 영도 4.22 m s^{-1} , 죽변 4.09 m s^{-1} , 부산 3.59 m s^{-1} , 김해 3.32 m s^{-1}) 존재하여 타 지역에 비해 여름동안의 풍속 감소가 작음을 알 수 있다.

KLAPS 분석자료를 이용한 분포도에서도 역시 겨울동안 내륙 고지와 해안, 도서 지역에서 2 m s^{-1} 이상의 풍속이 나타나며 그 외 내륙 평지에서도 1.5 m s^{-1}

이상의 지역이 넓게 나타난다. 여름에 이르러 전국적으로 풍속이 급격히 약해지며 특히 소백산맥 일대에서 뚜렷하다. 하지만 경남지역은 여름에도 비교적 넓은 영역에 걸쳐 1.5 m s^{-1} 이상의 풍속이 유지되며, 해안지역에서 2 m s^{-1} 이상의 영역이 겨울보다 오히려 증가함을 보인다.

850 hPa 등압면의 RDAPS 분석자료를 이용하여 계절별 종관 규모의 평균 풍속과 평균 바람 벡터를 Fig. 7에 각각 나타내었다. 4계절 중 중위도 지역에 가장 강한 기압경도력이 형성되는 겨울철은 시베리아 고기압의 동쪽 가장자리를 따라 서해상에서 8 m s^{-1} 이상의 북서강풍대가 존재하며, 한반도 상공은 $7\sim 9 \text{ m s}^{-1}$ 의 바람이 분포한다. 하지만 여름에 한반도는 전반적으로 열대기단 하에서 기압경도력이 약화되어 850 hPa 등압면 풍속이 $6\sim 7 \text{ m s}^{-1}$ 로 감소한다. 다만 대한해협 상공에 상대적으로 강한 남서 계절풍이 존재한다. 따라서 여름 동안은 이 강풍대에 가까울수록 바람이 강할 수 있으며, 이것이 여름 약풍에도 불구하고 경남해안에는 비교적 강풍이 유지되는 원인이다.

3.4 강풍 지점들의 바람

내륙 지역 중 평균풍속이 강한 15개 지점(Fig. 8)의 평균풍속, 등급계수, 형상계수, 발전가능 풍속의 빈도, 풍향의 지속성, 풍력밀도를 Table 2에 정리하였다. 일반적으로 높이 80 m의 대형 풍력 발전기는 $3 \text{ m s}^{-1}\sim 30 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속에서 가동된다. 따라서 발전가능 풍속 빈도는 이 구간 풍속 빈도율을 의미한다. 이때 Deacon식(식 6)을 이용하여 10 m 고도의 바람을 80 m 고도 높이로 환산하였다. α 는 풍력의 마찰계수로(wind shear

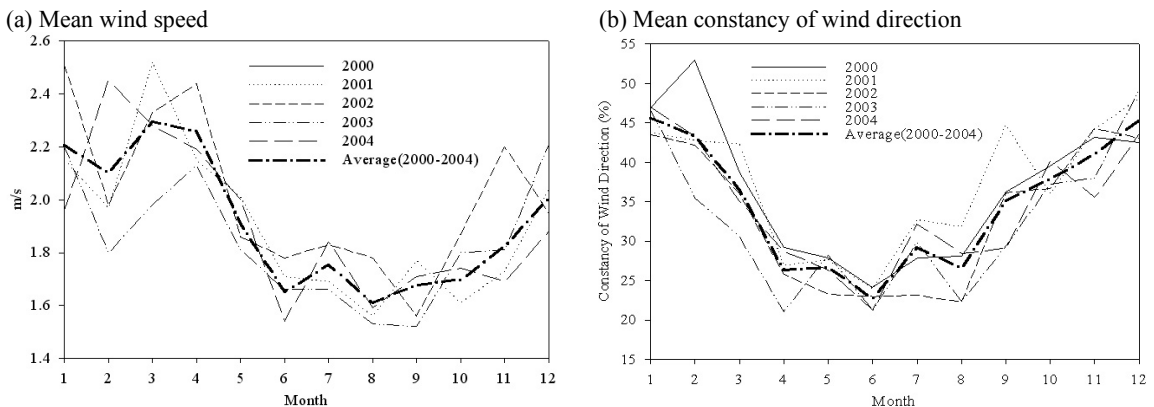


Fig. 5. Seasonal variation of monthly (a) mean wind speed and (b) mean constancy of wind direction for total stations recorded each year (2000–2004) and the average for 5 years.

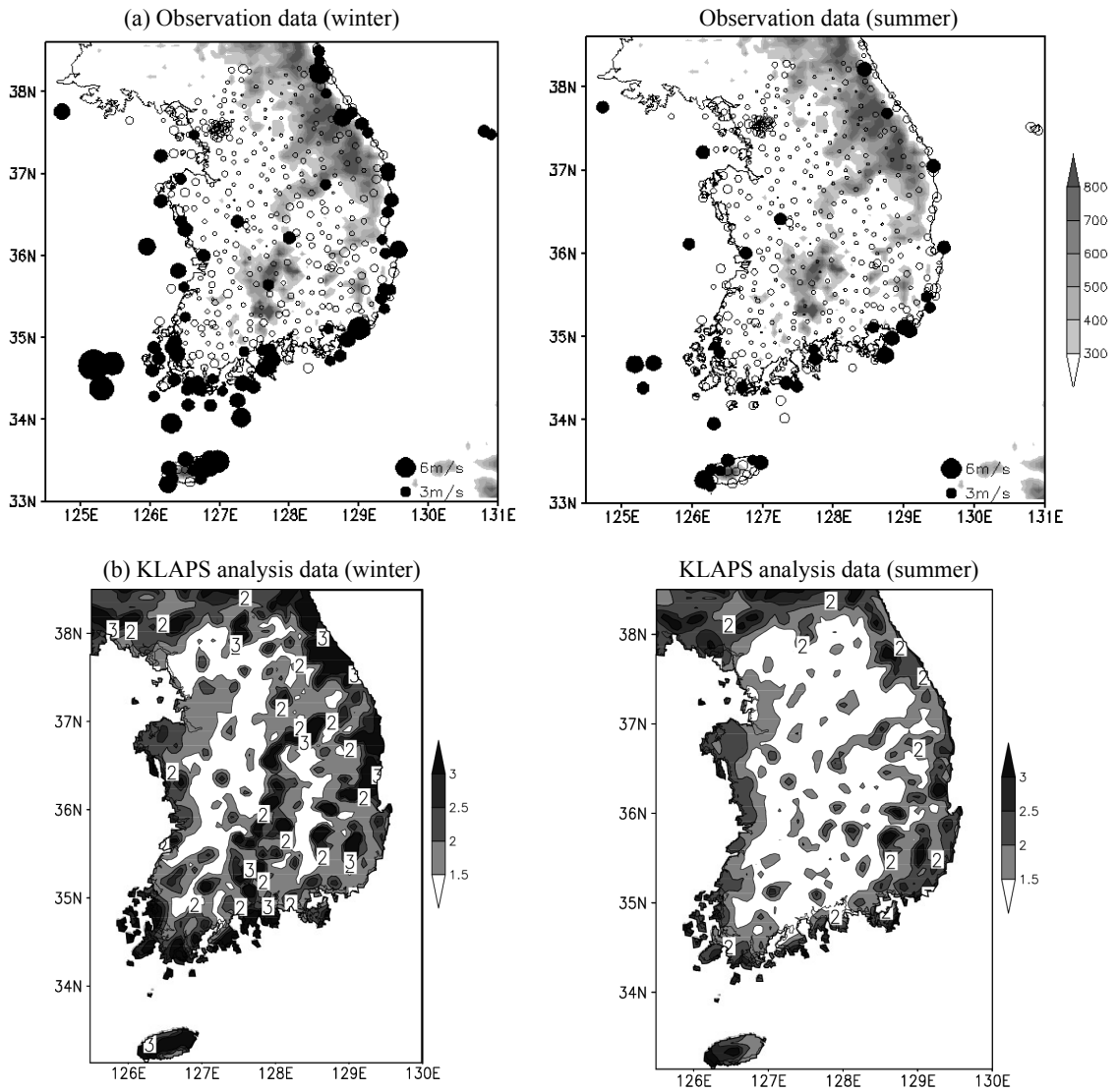


Fig. 6. Similar to Fig. 2, except for mean wind speed in winter (DJF) and summer (JJA).

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a \quad (6)$$

exponent)로 지역적 지표 거칠기(해상: 0.12 ~ 도시: 0.4)에 따라 다르다. 따라서 지표 10m 고도의 5 m s^{-1} 풍속은 그 지역 지표 거칠기에 따라 $11.4 \text{ m s}^{-1} \sim 6.4 \text{ m s}^{-1}$ 의 80m 고도 풍속으로 환산될 수 있다. 본 연구에서는 마찰계수를 풍력연구에서 가장 널리 인용되고 있는 1/7로 통일하여 계산하였다(Weisser and Foxon, 2003).

등급계수와 형상계수를 이용하여 계산된 Weibull 확률 밀도 분포를 각 지점 별로 Fig. 9에 제시하였다.

내륙 중 가장 강한 평균풍속(5.66 m s^{-1})은 구덕산에서 관측되었다. 형상계수와 등급계수 또한 높은 값을 보여, 약 5 m s^{-1} 의 강풍을 중심으로 풍속 분포가 집중됨을 볼 수 있다(Fig. 9). 이에 따라 전체 바람 중 91.0%를 발전용으로 사용할 수 있다. 풍력밀도는 215.7 W m^{-2} 이며 이는 4단계 풍력 등급에 해당한다. 미시령에서 내륙 중 두 번째로 강한 평균풍속(5.15 m s^{-1})이 관측되나 형상계수가 1.17로 15개 지점들 중 가장 낮다. 그에

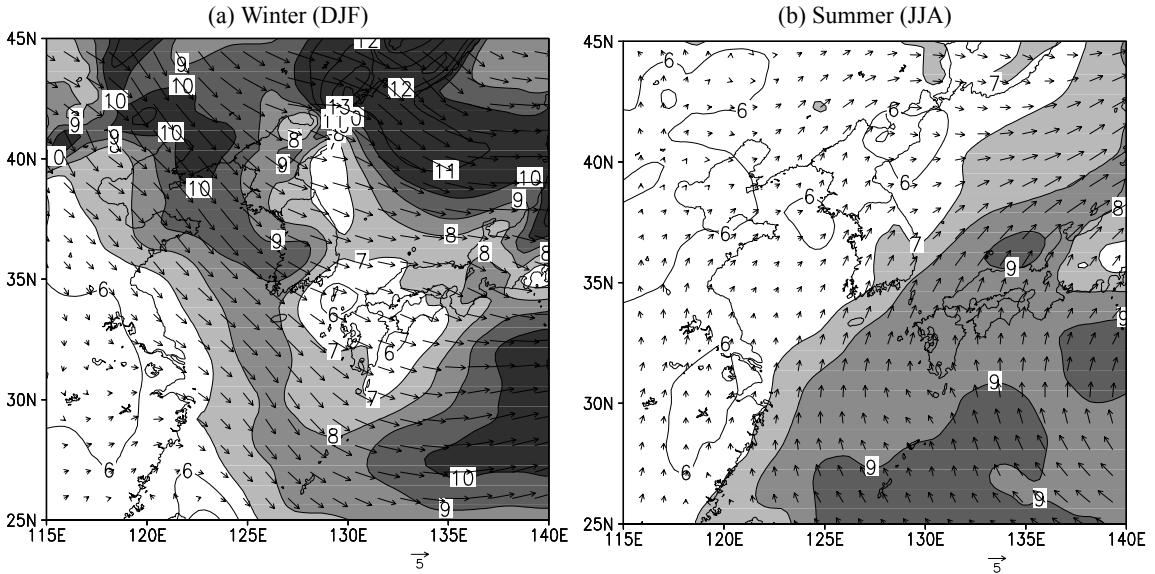


Fig. 7. Distribution of seasonal mean isotachs and wind vector at 850 hPa obtained from RDAPS analysis data. Areas with wind speed higher than 7 m s^{-1} are shaded.

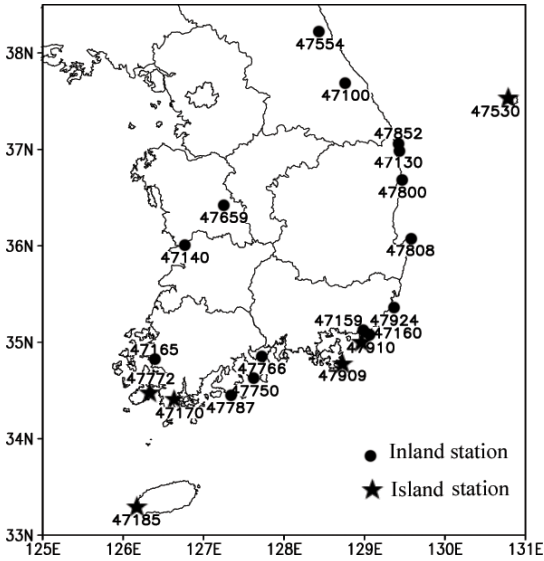


Fig. 8. Distribution of 21 stations with high wind speed. Closed circles and stars indicate inland stations (15) and island stations (6), respectively. Numerals indicate the station number.

따라 2 m s^{-1} 이하의 약풍을 중심으로 풍속 빈도가 분포하고 있다(Fig. 9). 따라서 높은 평균풍속에도 불구하고 전체바람 중 68.9%만이 발전용으로 사용 가능하다. 하지만 이 지점은 돌풍의 빈도 또한 높아, 풍속의 세계

급에 비례하는 풍력밀도는 346.7 W m^{-2} 로 6단계 풍력 등급에 해당한다. 이는 내륙 중 가장 높은 값이다. 나머지 13개 지점들 중 3단계 풍력 등급에 해당하는 156.5 W m^{-2} 가 나타나는 측면 지점을 제외하면 모두 1~2등급의 낮은 풍력밀도를 보인다. 전국 내륙에 고르게 분포되어 있는 392개 지점들 중 상위 3.8%에 해당하는 강풍 지점들임에도 불구하고 이렇게 낮은 풍력 등급을 보임은 풍력발전 부지 선정에 있어 더욱 정밀한 관측 정보가 필요함을 시사한다. 기타 풍향 요소들 중, 형상계수는 영천($k=2.54$)과 울진($k=2.02$)에서 높다. 그에 따라, 이 두 지점의 상대적으로 약한 평균풍속에도 불구하고, 풍속의 집중성이 높아(Fig.9) 발전 가능 풍속 빈도가 영천(82.8%)에서 2번째로 높고, 울진(75.9%)에서 5번째로 높다. 풍향의 일치율은 80%의 높은 값을 보이는 대관령 지점을 제외하고 약 20~50%로 대체적으로 낮다.

15개 지점의 월평균풍속을 Fig. 10에 제시하였다. 미시령, 대관령 지점의 풍속은 약 3 m s^{-1} 이상의 큰 연내 변동 폭을 가진다. 구덕산 풍속의 연내 변동 폭도 2.56 m s^{-1} 로 비교적 크지만, 내륙 중 가장 강한 풍속을 거의 연중 내내 유지한다. 15개 지점들은 대부분 연중 3 m s^{-1} 이상의 월평균풍속을 유지하지만 대관령, 백야, 울진, 후포 지점은 여름철에 3 m s^{-1} 이하로 감소한다.

같은 방법으로 도서 지역 중 평균풍속이 강한 지점

Table 2. Wind information for 15 stations with high wind speed (WS) over inland or seashore.

Station (Station number)	Height(m)	Mean WS ($m s^{-1}$)	Scale Parameter c($m s^{-1}$)	Shape Parameter k	$3 m s^{-1} <$ WS(80 m) $< 30 m s^{-1}$ (%)	Constancy of direction (%)	Wind power density ($W m^{-2}$)
Gudeok (Mt.) (47160)	517	5.66	6.39	1.97	91.0	40.1	215.7
Mishiryong (47554)	771	5.15	5.43	1.17	68.9	35.9	346.7
Homigod (47808)	7	4.64	5.22	1.86	81.5	31.3	125.9
Dohwa (47787)	141	4.48	5.01	1.66	78.7	35.3	130.2
Jukbyeon (47852)	33	4.39	4.82	1.40	74.4	29.7	156.5
Daegwallyeong (47100)	842	4.2	4.64	1.48	70.3	80.0	124.7
Mokpo (47165)	37	4.03	4.48	1.56	72.4	28.6	102.5
Gunsan (47140)	25	3.91	4.35	1.57	72.3	22.0	93.0
Kyeryong(Mt.) (47659)	835	3.83	4.25	1.54	69.3	30.6	89.5
Baekya (47750)	20	3.76	4.11	1.37	65.4	34.4	102.7
Busan (47159)	69	3.54	3.99	1.88	72.9	13.6	55.4
Uljin (47130)	49	3.53	3.98	2.02	75.9	47.1	50.6
Hupo (47800)	53	3.51	3.89	1.51	65.0	50.0	71.2
Ganjolgot (47924)	19	3.41	3.78	1.51	64.8	19.0	65.4
Yeocheon (47766)	5	3.39	3.81	2.54	82.8	30.4	37.0

들의 풍향 요소를 Table 3에 정리하였고, Weibull 확률 밀도 분포를 Fig. 11에 제시하였다. 도서 지역은 전반적으로 풍속이 강하므로, 상주인구가 만 명 이상으로 규모가 큰 도서지역에 위치한 지점들 중, 평균풍속이 $3 m s^{-1}$ 를 초과하는 지점들을 대상으로 분석하였다. 이에 해당하는 지점은 고산, 서이말, 완도, 영도, 태하, 고군이다. 제주도는 12/15 지점들에서 $3 m s^{-1}$ 이상의 평균 풍속이 관측되었다. 따라서 대표적으로 그 중 풍속이 가장 강한 고산 지점을 분석하였다. 고산에서 전국 457개 지점 중 가장 강한 평균풍속인 $7.77 m s^{-1}$ 가 관측되었다. 형상계수는 1.65로 다소 높고, $10 m s^{-1}$ 이상의 강풍 빈도도 타 지역들에 비해 월등히 높게 나타난다 (Fig. 11). 따라서 전체 바람 중 92.6%를 발전용으로 이용할 수 있는 높은 효율을 보인다. 풍력밀도는 $683.9 W m^{-2}$ 로 가장 높은 풍력 등급인 7단계에 해당된다. 서이

말과 완도 지점은 평균풍속이 $4 m s^{-1}$ 이상이고 풍력밀도는 2단계 풍력 등급에 해당한다. 나머지 영도, 태하, 고군 지점은 1단계 풍력 등급을 보인다. 6개 지점 모두 50%이하의 낮은 풍향 일치율을 보이며 특히 완도에서 7.3%로 낮다.

6개 지점의 월평균풍속을 Fig. 12에 제시하였다. 고산 지점은 12월에서 2월까지 풍속이 $10 m s^{-1}$ 이상으로 강하며, 5월에서 9월까지 5~ $6 m s^{-1}$ 의 풍속이 유지된다. 고군과 태하 지점은 여름동안 풍속이 $3 m s^{-1}$ 이하로 감소한다. 반면에 경남연해에 위치하는 서이말과 영도 지점은 겨울철보다 여름철에 풍속이 강하다.

4. 결 론

본 연구는 2000년부터 2004년까지 5년 동안의 457

Table 3. Same as Table 2, but for the 6 island stations.

Station (Station number)	Height (m)	Mean WS ($m s^{-1}$)	Scale Parameter c($m s^{-1}$)	Shape Parameter k	$3 m s^{-1} <$ WS(80 m) $< 30 m s^{-1}$ (%)	Constancy of direction (%)	Wind power density ($W m^{-2}$)
Gosan (47185)	71	7.77	8.69	1.65	92.6	30.6	683.9
Seoimal (47909)	110	4.51	5.04	1.59	77.6	47.3	141.4
Wando (47170)	34	4.01	4.43	1.47	66.1	7.3	110.0
Yeongdo (47910)	60	3.79	4.21	1.52	67.9	24.4	88.6
Taeha (47530)	171	3.33	3.59	1.30	55.2	30.1	76.6
Gogun (47772)	30	3.15	3.48	1.47	59.8	27.5	53.5

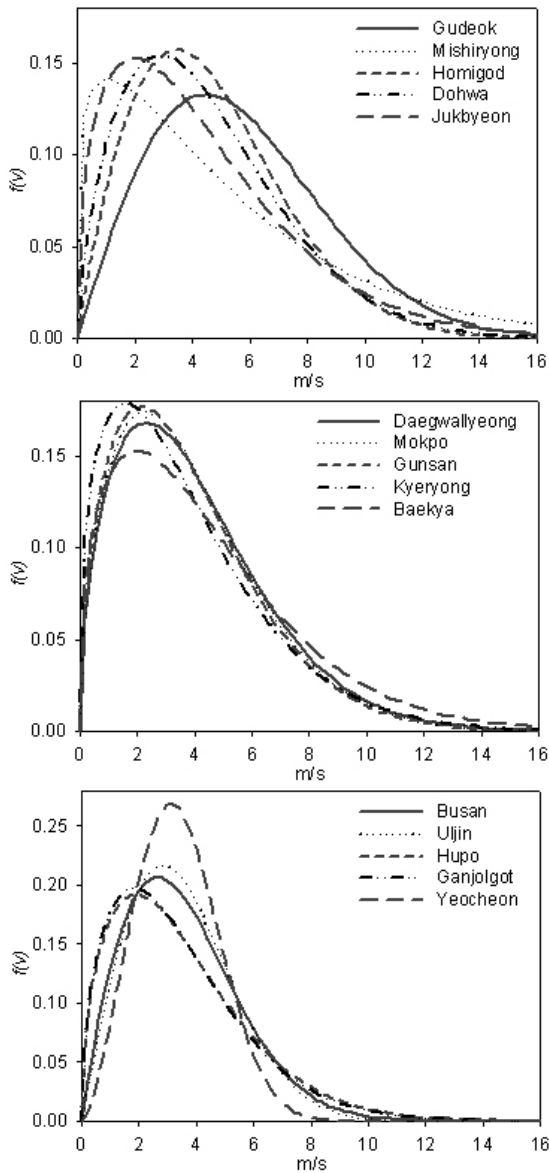


Fig. 9. Weibull probability distribution of wind speed for the 15 inland stations.

개 지점의 매시 바람 관측 자료를 이용하여 한반도 내 바람자원의 시공간적 분포를 분석하였다. 보조 자료로써 2004년 6월 1일부터 2005년 5월 31일까지 1년 동안의 KLAPS, RDAPS 바람 분석자료가 사용되었다.

평균풍속이 3 m s^{-1} 이상으로 풍황이 좋은 지점들은 총 62개 지점이며, 주로 해안, 산악, 도서 지역들이다. 이들 강풍 지역에서도 다음과 같은 지리적, 시간적, 계절적 조건에 따른 제약들을 있다. 먼저, 해안 지역들 중

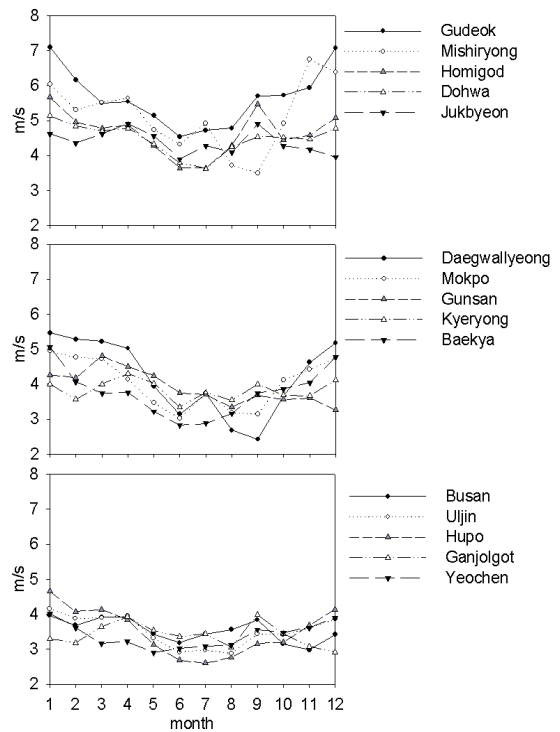


Fig. 10. Seasonal variation of mean wind speed for each of the 15 inland stations.

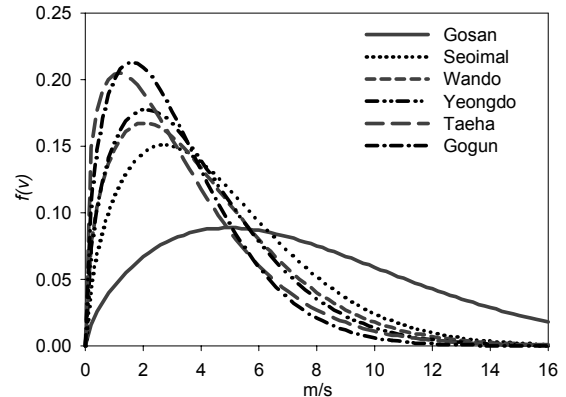


Fig. 11. Same as Fig. 9 but for the 6 island stations.

경기도 해안은 바람이 약하다. 이는 경기만의 지리적 특성으로 인해 정 서풍을 제외한 바람은 육지를 거쳐 경기도 해안에 다다르기 때문이다. 산악 지역의 강풍은 KLAPS 분석자료에서는 뚜렷하게 보이나, 관측자료에서는 500m 이상의 고지에 위치한 22개 지점 중 오직 5개 지점에서만 나타난다. 이를 통해 산악 지역의 풍황을 묘사하기에는 관측 지점의 수가 부족하다는 것을 알

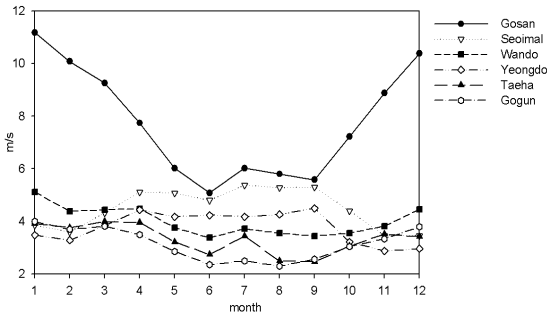


Fig. 12. Same as Fig. 10 but for the 6 island stations.

수 있다. 또한 지형고도가 높다 해서 풍속이 반드시 강한 것은 아님을 의미하며, 산악 지역 풍력발전 부지 선정 시 더욱 정밀한 사전 관측정보가 요구됨을 시사한다. 둘째, 바람은 주간에 강하나, 야간에는 약하다. 서해안은 편서풍과 야간 육풍의 방향이 반대이므로 야간 약풍이 더 뚜렷하게 나타난다. 산악 지역은 산풍의 영향으로 야간의 풍속 감소 정도가 작다. 셋째, 바람은 겨울에 강하나, 여름에는 약하다. 겨울동안은 전체 관측 지점 중 19.5%에서 평균풍속이 3 m s^{-1} 이상이며, 이에 따라 풍력발전이 용이한 지역이 다수 존재한다. 하지만 여름동안은 그 절반도 못 미치는 7.7%에서만 나타나며, 소백산맥의 고지를 포함한 내륙 전체에서 바람이 약해진다. 여름의 전력수요는 겨울만큼이나 크지만, 풍력 발전이 용이한 지역은 매우 국한되어 짐을 의미한다. 여름동안에도 강한 풍속이 유지되는 지역으로는 경남해안이 유일하게 발견된다. 이는 여름철 대한해협에 형성되는 남서계절풍의 강풍대와 가장 인접하기 때문이다.

내륙 강풍 지역들(구덕산, 미시령, 호미곶, 도화, 죽변, 대관령, 목포, 군산, 계룡산, 백야, 부산, 울진, 후포, 간절곶, 영천)의 평균 풍속, 등급 계수, 형상 계수, 발전 가능 풍속 빈도율, 풍향 일치율, 풍력밀도, 풍속의 Weibull 확률 밀도를 따로 정리하였다. 내륙 중 부산의 구덕산 지점에서 가장 높은 평균풍속(5.66 m s^{-1})과 함께 전체바람 중 91.0%를 발전용으로 사용할 수 있어 발전 효율이 가장 뛰어나다. 그 밖의 강풍 지점들에서는 최고 81.5%(호미곶)에서 최저 64.8%(간절곶)의 바람을 발전용으로 사용할 수 있다. 풍력밀도는 15개 지점 중 12개 지점이 1~2단계의 낮은 풍력 등급에 해당하며, 풍향의 일치율 역시 대관령(81.5%)을 제외하고 약 20~50%로 대체적으로 낮다. 전국 내륙 지점들 중 가장 바람이 강한 지점들임에도 불구하고, 이렇게 낮은 등급의 풍향요소들이 나타남은 풍력발전 부지 선정 시

체계적이고 세밀한 사전 조사가 무엇보다 중요함을 시사한다.

도서 지역에 위치한 6개 강풍 지점들(고산, 서이말, 완도, 영도, 태하, 고군)의 풍향 정보 역시 정리되었다. 고산에서 전국에서 가장 높은 평균풍속(7.77 m s^{-1})과 더불어 풍력 등급 7단계에 해당하는 높은 풍력밀도(683 W m^{-2})가 나타났다. 나머지 5개 지역들의 풍력 등급은 1~2단계에 해당되며, 경남 연안에 위치하는 영도와 서이말에서는 전국에서 유일하게 여름에 오히려 풍속이 증가하는 특징을 보였다.

우리나라에서 가장 풍향이 좋은 곳은 제주도이며, 내륙에서는 해안과 가까운 고지일수록 풍향이 좋을 확률이 높다. 제주도의 풍향 조사는 이미 여러 연구자들에 의해 자세히 다루어진 바 있고(김경보 등, 2006; 김현구 등, 2006), 향후 추가 풍력 단지가 설립 계획 하에 있다. 내륙 지역 역시 해안과 인접한 강원도 산지 지역에 풍력 단지가 운행 중에 있으며, 앞으로도 추가 설립 예정이다. 하지만 본 연구 결과, 내륙 중 가장 좋은 풍향이 존재하는 구덕산 지점을 포함하며, 여름에도 강한 풍속이 유지되는 경남해안지역은 상대적으로 관심을 받지 못하고 있다. 향후 대규모 풍력발전 부지 선정 시 이 지역의 풍향을 우선적으로 집중 관측, 분석하면 상당히 효율이 높은 지역을 찾을 수 있을 것이라 사료된다. 또한, 남해안의 반도 지역에도 풍향이 좋은 지점이 다수 존재하며, 남해는 동해와 달리 천해지역이 넓게 분포하므로, 내륙 뿐 아니라 해상 풍력단지의 건설도 유망하다. 한편, 현재 건설 계획 중인 경기도 안산과 그 부근인 시화방조제 지역은 한반도 해안 지역들 중 상대적으로 약풍 지역에 속하며, 경기도 양구군 역시 내륙 지역 중 풍향이 좋은 지역으로 분류되지 않아, 발전효율이 기대치보다 낮을 우려가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2006-2306)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

김경보, 김동호, 오영숙, 송문호, 2006: 제주도 바람자료 분석에 의한 풍력자원 연구. *한국기상학회 봄철 학술대회 논문집*, 270-271.
 김현구, 이화운, 정우식, 2005: 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력자원 평가.

- 한국대기환경학회지, **21**, 63-72.
- 김현구, 장문석, 경남호, 2006: 기상통계분석에 의한 제주도 풍력자원 데이터베이스 구축. *한국신재생에너지학회 06춘계학술대회*, 296-297.
- 박경호, 김진훈, 정현생, 1990: 국내의 풍력자원 특성 분석. *태양에너지*, **10**, 3-9.
- 한국동력자원연구소, 1989: 풍력자원 조사 및 분석(Ⅰ). 한국동력자원연구소 연구보고서, 245.
- 한국동력자원연구소, 1990: 풍력자원 조사 및 분석(Ⅱ). 한국동력자원연구소 연구보고서, 167.
- 한국에너지기술연구원, 1997: 풍력발전 유망지역의 풍력자원 정밀조사. 한국에너지기술연구원 연구보고서, 124.
- 한국에너지기술연구원, 2003: 국내 풍력자원 추정 및 향후 과제. 한국에너지기술연구원 연구보고서, 212.
- 한국에너지기술연구원, 2005: 풍력자원 정밀조사 및 풍력단지 개발 기술 증진 연구. 산업자원부 연구보고서, 329.
- 이은정, 조일성, 허철운, 김태룡, 이동일, 김영신, 2008: 기상정보를 활용한 풍력자원지도 개발 연구. *한국기상학회 봄 학술대회 논문집*, 332-333.
- Bourillon, C., 1999: Clean power for generations. *Renewable Energy*, **16**, 948-953.
- Celik, A. N., 2003: Assessing the suitability of wind speed probability distribution functions based on wind power density. *Renewable Energy*, **28**, 1563-1574.
- Ian, M., 1996: The status and prospects for wind energy. *Renewable Energy*, **8**, 29-33.
- Persaud, S., D. Flynn, and B. Fox, 1999: Potential for wind generation on the Guyana coastlands. *Renewable Energy*, **18**, 175-189.
- Sopian, K., M. Y. H. Othman, and A. Wirsat, 1995: The wind energy potential of Malaysia. *Renewable Energy*, **6**, 1005-1016.
- Ulgen, K., and A. Hepbasli, 2002: Determination of Weibull parameters for wind energy analysis of Izmir, Turkey. *International journal of Energy Research*, **26**, 495-506.
- Weisser, D., and T. J. Foxon, 2003: Implications of seasonal and diurnal variations of wind velocity for power output estimation of a turbine: a case study of Grenada. *International journal of Energy Research*, **27**, 1165-1179.