

종관 바람 관측 자료를 이용한 북한 지역의 풍력자원 분석

윤준희¹ · 서은경^{1,*} · 박영산² · 김학성³

¹공주대학교 사범대학 지구과학교육과, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

²국립기상연구소, 156-720, 서울시 동작구 기상청길 45

³한국교육원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 산 7

An Analysis of Wind Energy Resources using Synoptic Observational Data in North Korea

Jun-Hee Yun¹, Eun-Kyoung Seo^{1,*}, Young-San Park², and Hak-Seong Kim³

¹Department of Earth Science Education, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

²National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

³Department of Earth Science Education, Korea National University of Education,
Chungbuk 363-791, Korea

Abstract: Wind power density distribution over the North Korea territory was investigated by using 30-year wind observations at 27 meteorological stations. The mean annual wind power density over North Korea turned out to be 58.6 W/m^2 , which corresponds to the wind power class of 1. The wind power density shows a seasonal variation, having the highest density in spring and the lowest in summer. In particular, the wind power density in summer is about a half of that in spring. The diurnal variation of the wind power density shows that the highest and lowest densities occur in the afternoon and between 3 and 6 am in local time, respectively. The most potential wind energy generation regions are the Gaema Plateau in the central region, the northeast part of Hamgyeongbuk-do, the south coast of Pyongan-do and the west coast of Hwanghae-do. The mean annual wind power density in Changjin is 151.2 W/m^2 , which is equivalent to the class of 3. In Ryongyon, the annual mean wind power density is 102.4 W/m^2 , which belongs to the class of 2.

Keywords: wind, wind power density, North Korea, Weibull function, diurnal variation

요약: 북한 지역의 27개 기상관측지점의 30년 바람 자료를 이용하여 고도 50 m에서의 풍력밀도를 분석하였다. 27개 지점의 연평균 풍력밀도는 58.6 W/m^2 로 1등급에 해당하는 풍력 자원이었다. 계절에 따른 평균 풍력밀도는 겨울보다 봄에 더 높았으며, 여름에는 봄의 50% 정도의 풍력밀도를 나타냈다. 풍력밀도의 일변화를 보면 거의 모든 관측 지점에서 오후에 비교적 높은 풍력밀도와 오전 3-6시 경에 낮은 풍력밀도를 보였으며, 일변화의 진폭은 봄에 가장 컸다. 특히 내륙 중심부인 개마고원 지역과 함경북도 동북부, 평안도 남부 해안, 황해도 해안 근처에서 비교적 높은 값을 나타냈다. 장진에서의 연평균 풍력밀도는 3등급인 151.2 W/m^2 를 나타냈으며, 용연은 2등급인 102.4 W/m^2 의 값을 보였다.

주요어: 바람, 풍력밀도, 북한, 와이블 함수, 일변화

서론

기후 협약에 의한 온실가스 규제와 고유가시대의 도래로 신 재생에너지의 개발의 필요성이 더욱 절실히 되고 있다. 북한은 2005년에 지구온난화의 규제 및

방지를 위한 국제협약인 유엔기후변화협약인 교토의 정서에 동참하였다(손충렬, 2006; 장용훈, 2005). 화석에너지에 전적으로 의존하는 북한으로서는 새로운 대체 에너지의 중요성이 대두되었고, 이에 따라 에너지 공급 방식의 다양화가 필요하게 되었다. 특히 전력난을 겪고 있는 북한에서는 대체 에너지 개발을 위해 풍력발전을 활용하는 방안이 확대 추진되고 있다. 풍력의 발전 단가는 기존 발전 방식인 수력이나 원자력에 비해선 높은 편이지만, 태양광이나 연료전

*Corresponding author: ekseo@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8293

Fax: 82-41-850-8299

지 등 다른 친환경 대체에너지보다는 훨씬 낮은 것으로 알려졌다. 일반적으로 1 GWh의 전력을 얻기 위한 풍력 발전의 소요 면적은 약 $1,335 \text{ m}^2/\text{GWh}$ 이다. 이 값은 석탄과 태양열 발전의 약 40%의 값으로 풍력 발전이 가장 작은 면적 내에서 많은 전력을 생산해 낼 수 있음을 의미한다(장문석, 2008; 김현구와 최재우, 2002; 이민식, 2008).

북한은 1978년에 풍력 자원 조사단을 구성하여 지난 20년 동안 북한 전 지역 130개 지점에서 풍속 데이터 측정기를 설치하여 풍속 자료를 수집해왔다(이유진 외, 2007). 이 결과 연평균 풍속이 4.5 m/s 인 지역이 국가 전 면적의 18%를 차지하는 것으로 나타났다. 이 자료를 바탕으로 4GW에 달하는 풍력 에너지를 만들어 낼 수 있는 기후적 여건을 가지고 있음을 보고하고 있다(손충렬, 2006). 2007년에는 총 5천 kW의 풍력발전 시범 단지에 설치하여 풍력발전 도입 범위를 확대해 나갈 계획이며(조동호 외, 2007), 중장기적으로 2020년까지 풍력 단지 조성 및 풍력 에너지 분야 개발을 통해 총 풍력 발전 에너지량이 500 MW에 이를 것으로 예상하고 있다(손충렬, 2006). 하지만 위의 내용은 국내의 보고서 등에 의해 보고된 자료들로 현재 국내에서는 북한의 풍력 자원 분포를 파악하기 어려운 실정이다. 남한의 바람 분포에 대한 많은 연구가 있었지만(예, 김현구 외, 2005; 김현구 외, 2006; 이은정 외, 2008; 김도우와 변희룡, 2008), 북한지역의 바람장에 관한 연구는 그리 많지 않다. 최근 국내 연구로는 수치바람모의 자료를 이용한 한반도에서의 저해상도 국가바람지도의 구축(김현구 외, 2006)과 북한의 지상관측 바람자료를 이용한 30년간의 평균 바람 지도 구축(서은경 외, 2009)이 있다. 하지만 지금까지 관측자료를 바탕으로 한 풍력 에너지 분포에 관한 연구 보고는 없다.

따라서, 본 연구에서는 북한의 30년간 지상관측 바람 자료를 이용하여 공기의 운동에너지 분포에 대해 분석함으로써 북한의 전체적인 풍력자원의 분포와 그 특성을 파악하고자 한다. 따라서 이 연구는 북한의 풍력 에너지 활용의 경제성 평가와 풍력 자원 선정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 사용한 30년간의 기상관측소 자료의 이용은 분석된 풍력 자원 분포에 대한 신뢰성을 한층 높일 수 있을 것으로 기대된다.

사용한 자료 및 분석 방법

사용한 자료

본 연구는 북한의 27개 관측소의 1978년 1월-2008년 12월까지의 30년간 3시간 간격, 지표로부터 10 m 고도의 풍속과 풍향의 자료를 이용하여 북한 지역의 풍력을 분석하였다. 27개 기상관측지점은 북한의 9개의 각 도에 골고루 분포하고 있어서 이 지역의 전체적인 풍력 특성을 파악하는데 충분할 것으로 보이지만, 북한 관측소의 30년간 바람 자료는 무풍을 많이 포함하고 있었다(서은경 외, 2009). 이 기간 동안 전체 자료 중 무풍은 여름, 가을, 겨울 동안 약 44%이었으며, 봄 동안은 38%에 달하였다. 참고로 남한지역, 무인기상관측소 성주, 고령, 달성, 서구 지점의 5년(2005-2009년) 동안 관측한 바람 중 무풍 빈도는 각각 20, 33, 5, 1%로 나타났다.

일반적으로 지표에서의 바람을 이용하여 경제층 하부의 특정 고도에서의 바람을 얻기 위하여 바람지수식(wind power law) 또는 로그식(logarithmic law)을 널리 사용하고 있다(Panofsky, 1973; Panofsky and Dutton, 1984). 두 접근방법 모두가 바람이 강할 때 가장 잘 적용 가능하며, 대체로 6m에서 164 m 사이의 바람을 추정할 때 바람지수식이 로그식보다 실제 바람을 더 잘 표현하는 것으로 알려져 있다(Zhang, 1981). 따라서 이 연구에서는 바람지수식을 이용하여 지상 10 m에서의 풍속을 지상 50 m 고도로 외삽하였다(서은경 외, 2009). 바람지수식에서 지수는 지표면 난류 경제층에서 고정된 값(0.143)을 갖는 것으로 가정하기도 하지만(Weisser and Foxon, 2003), 본 연구에서는 위의 값을 사용하기 보다는 미국지질조사소(The United States Geological Survey: USGS)의 32개 거칠기 길이 분류표를 사용하여 각 관측소의 지면 거칠기 길이의 분포 얻었으며, 이를 바탕으로 계산된 지수 값을 사용하였다(서은경 외, 2009). 특히 북한의 자료에 대해서는 30년간의 장기간의 자료를 사용함으로써 무작위 오차(random error)를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대되지만, 계통 오차(systematic error)에 대한 양질의 검사를 수행할 수 없는 상황이어서 무풍의 경우에 위의 두 접근 방법을 통해 특정 고도에서의 풍속으로 외삽할 경우 실제 바람보다 과소 평가될 수 있는 문제가 발생할 수 있다. 이 문제

를 완화하기 위하여 풍속의 확률밀도함수(probability density function)를 사용하였다.

한편, 풍력자원은 시간별 계절별 변동성이 큰 자원으로 매해 변할 수 있기 때문에 어느 지역의 풍력자원을 평가하기 위해서는 수년간에 걸쳐 측정된 풍속 자료를 바탕으로 분석되어야 한다. 특히 사용한 자료의 연도 수가 증가할수록 바람지수식을 이용한 외삽된 바람의 오차가 작아지는 것으로 알려진 바 있다. 예를 들어 50 m 고도로 외삽된 바람이 실제 바람과의 오차가 5% 이내로 작아짐을 보고하고 있다 (Khan and Iqbal, 2004; Jewer et al., 2005). 따라서 본 연구는 30년간의 바람 자료를 사용하기 때문에 외삽으로 인한 오차가 상당히 줄어들 것으로 기대된다.

분석 방법

북한의 바람자료의 양질검사를 수행할 수 없는 상황에서 무풍 문제의 해결 방법으로 어느 지역에서 풍속의 확률밀도함수를 알고 있다면, 특정 풍속에 대한 풍속 확률을 예상할 수 있을 것이다(Celik, 2003). 일반적으로, 풍속의 확률밀도함수는 와이블 함수(Weibull function)로 잘 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다(예, 박경호 외, 1994; Celik, 2003; 기상청, 2007). 이 와이블 함수를 확률밀도 함수로 사용하여 평균한 바람과 실제 관측된 바람과의 오차는 11%보다 훨씬 작은 오차임이 연구된 바 있다(Celik, 2003). 어느 특정 풍속(V)일 확률을 와이블 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$f(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right], \quad (1)$$

여기서 V는 예상하는 풍속(m/s), C는 평균 풍속에 비례하는 등급계수(scale parameter), K는 풍속 분포의 편차의 크기를 나타내는 형상계수(shape parameter)로 다음과 같다.

$$C = \frac{\bar{V}}{\Gamma(1+1/K)} \quad (2)$$

K는 관측자료의 확률 분포에 가장 근접한 곡선을 이용하여 결정될 수 있지만, 간단하게는 다음과 같이 표준편차와 평균풍속의 함수로 나타낼 수 있다.

$$K = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad (1 \leq K \leq 10) \quad (3)$$

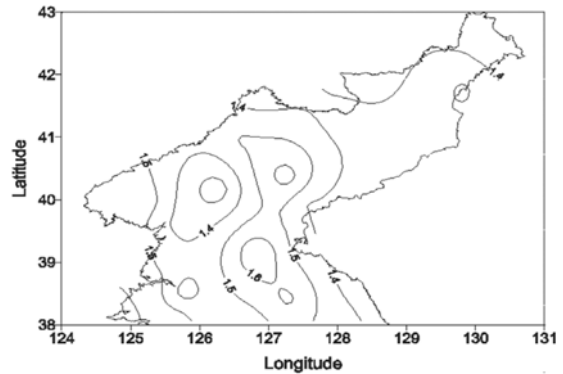


Fig. 1. Spatial distribution of annual mean K (shape parameter) at 50 m altitude above ground.

따라서 C는 K의 함수이기도 하지만 평균 풍속과 밀접히 관련되어 있음을 알 수 있다. 또한 K값은 풍속분포에서의 그 편차와 밀접히 관련되어 있음을 알 수 있다. 같은 값의 평균 풍속에 대해서 풍속의 확률 분포가 넓게 분포할 경우 K값이 작아짐을 알 수 있다. 50 m 고도에서 K값은 1.23-1.70의 범위 안에 있으며, 연평균은 1.46으로 여름에 가장 큰 값인 1.49, 가을에 가장 작은 값인 1.45를 나타냈다. Fig. 1은 북한 지역에서의 K값의 공간적 분포를 나타낸 것인데 주로 풍속이 큰 지역에서 다른 지역보다 K값이 비교적 크게 나타나는 경향을 보인다(예, Stevens and Smulders, 1979; 박경호 외, 1994; 김도우와 변희룡, 2008).

와이블 함수인 확률밀도함수 P(V)를 풍속 0 m/s에서 풍속 V까지 적분한 누적분포함수(cumulative density function)인 F(V)는 다음과 같다.

$$F(V) = \int_0^V f(V)dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (4)$$

따라서 평균풍속은 다음과 같이 감마함수를 사용하여 표현할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \int_0^{\infty} V f(V)dV \\ &= \int_0^{\infty} V \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] dV \\ &= C \int_0^{\infty} x^{\left(\frac{1}{K}+1\right)-1} \exp(-x) dx \\ &= C \Gamma\left(\frac{1}{K}+1\right), \quad \left(\frac{1}{K}+1\right) > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 $x = \left(\frac{V}{C}\right)^K$ 이다. 이로부터 다음과 같은 풍속의 모멘트 관계식을 얻을 수 있다.

$$\bar{V}^n = C^n \Gamma\left(\frac{n}{K} + 1\right), \quad \frac{n}{K} + 1 > 0 \quad (6)$$

한편, 풍력 발전이란 공기의 운동 에너지의 기체역학적(aerodynamic) 특성을 이용하여 회전자(rotor)를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고, 이 기계적 에너지를 전기로 변환시키는 기술이다(Fig. 2). 공기의 이동으로 형성된 운동에너지는 통과한 공기의 질량(m)과 풍속(V)의 함수로, 바람에 의한 단위 시간당 풍력(wind power)은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 단, 시간에 따른 풍속의 변화가 없다고 가정한다.

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 \quad (7)$$

회전자의 단면적 A 를 통과하는 단위시간당 공기 질량의 변화량은 단면적 A 를 속도 V 로 통과하는 공기의 밀도(ρ)를 고려함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다(예, 박경호 외, 1994; 경남호 외, 2003; 고경남과 허종철, 2007; 윤재욱과 김명래, 2008)

$$P = \frac{1}{2} (\rho A V) V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (8)$$

단위 면적당 풍력에너지인 풍력밀도인 \bar{P} 는 (6)에서 $n=3$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma\left(\frac{3}{K} + 1\right), \quad \frac{3}{K} + 1 > 0 \quad (9)$$

(9)로부터 풍력에너지 밀도는 평균 풍속, 공기의 밀도와 풍속의 분포 특성에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한, 풍력 발전기에서 생성되는 전력생산량은 발전기의 회전자 면적과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 발전기의 회전자가 휩쓰는 면적(A)이 클수록 많은 양의 전력을 생산한다(Fig. 2).

전체적 풍력밀도 분포

이 절은 북한 기상관측소의 바람 자료와 와이블 함수를 바탕으로 (9)을 이용하여 연평균 및 계절평균의 풍력밀도 분포를 분석하였으며, 이를 Table 1에 정리하였다.

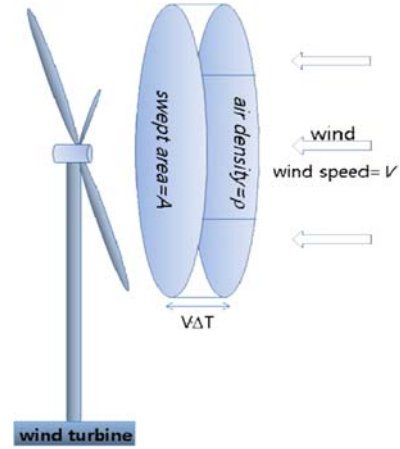


Fig. 2. Air flow passing through the swept area (A) of a wind turbine.

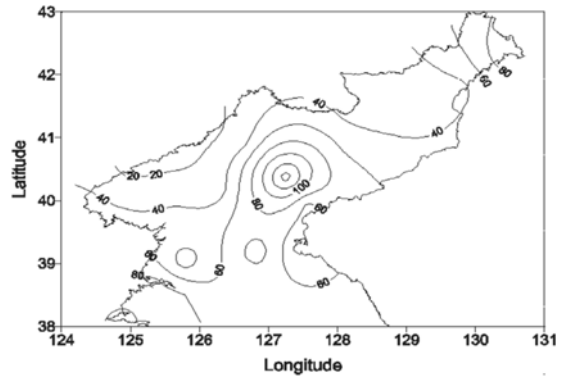


Fig. 3. Spatial distribution of annual mean wind power density (W/m^2) at 50 m altitude above ground.

연평균 풍력에너지 밀도

Fig. 3는 지상 10 m에서 관측된 풍속을 50 m 높이로 보정한 바람에 대한 30년 평균의 풍력밀도이다. 북한의 27개 관측소에 대한 연평균 풍속은 3.1 m/s 이었으며(서은경 외, 2009), 연평균 풍력밀도는 58.6 W/m^2 이었다. 연평균 풍력밀도가 50 W/m^2 미만인 지점이 전체 관측소의 44%, 100 W/m^2 미만인 지점이 93%를 차지하였다. 남한지역의 경우 77개 관측소의 연평균 풍속은 3.1 m/s, 연평균 풍력밀도는 74 W/m^2 이었다(김기훈 외, 2005). 50 W/m^2 미만의 연평균 풍력밀도를 보이는 지점이 전체 관측소의 64%, 100 W/m^2 미만인 지점이 79%를 차지하였다(김건훈 외, 2005).

한편 풍력발전기를 80 m 고도로 높인다면 50 m 고도에서의 풍력에너지보다 약 15% 정도의 더 많은

Table 1. Annual mean energy density (W/m^2) at 10, 50, and 80 m, and seasonal mean energy density (W/m^2) at 50 m altitude above ground for 27 meteorological stations in North Korea

Station	Lat (N)	Long (E)	10 m	50 m	80 m	Seasonal mean wind energy at 50 m altitude above ground			
						Spring	Summer	Fall	Winter
선봉(SENBONG)	42°19'	130°24'	45.0	93.9	109.4	92.7	39.6	92.8	158.5
삼지연(SAMJIYON)	41°49'	128°19'	9.1	28.1	35.8	37.3	21.4	26.8	26.9
청진(CHONGJIN)	41°47'	129°49'	14.1	34.4	42.0	37.6	18.1	32.5	49.3
중강(CHUNGANG)	41°47'	126°53'	8.3	29.4	38.3	40.0	20.5	26.6	20.7
혜산(HYESAN)	41°24'	128°10'	13.5	33.6	41.2	48.4	18.8	32.9	31.5
강계(KANGGYE)	40°58'	126°36'	10.1	27.7	34.6	39.8	19.0	21.6	25.9
풍산(PUNGSAN)	40°49'	128°09'	23.5	55.1	66.1	78.0	24.9	47.1	68.7
김책(KIMCHAEK)	40°40'	129°12'	19.0	45.5	55.1	74.7	33.1	48.5	31.8
수풍(SUPUNG)	40°27'	124°56'	6.2	17.6	22.3	22.3	9.8	16.5	21.4
장진(CHANGJIN)	40°22'	127°15'	72.1	151.2	175.2	177.8	114.7	139.2	166.8
신의주(SINUIJU)	40°06'	124°23'	19.3	42.3	50.4	52.0	23.5	39.2	55.1
구성(KUSONG)	39°59'	125°15'	12.1	32.5	40.3	42.7	23.6	24.3	36.7
회천(HUICHON)	40°10'	126°15'	11.4	28.1	34.5	46.6	18.3	18.1	25.4
함흥(HAMHEUNG)	39°56'	127°33'	25.3	56.6	67.3	65.6	37.5	46.1	79.0
신포(SINPO)	40°02'	128°11'	34.4	72.3	84.8	96.0	52.9	71.3	72.6
안주(ANJU)	39°37'	125°39'	24.9	55.5	66.0	82.4	47.8	41.0	50.3
양덕(YANGDOK)	39°10'	126°50'	28.1	90.7	113.9	125.3	63.5	82.8	94.6
원산(WONSAN)	39°11'	127°26'	15.8	40.0	48.9	52.8	23.3	31.7	53.2
평양(PYONGYANG)	39°02'	125°47'	10.8	28.6	35.5	43.2	13.9	21.3	38.9
남포(NAMPO)	38°43'	125°22'	38.6	83.5	98.2	114.8	60.7	71.6	87.4
장진(CHANGJON)	38°44'	128°11'	29.1	65.3	77.5	109.8	29.1	52.3	78.3
사리원(SARIWON)	38°31'	125°46'	39.1	80.8	94.2	108.7	55.4	60.5	103.2
신계(SINGYE)	38°30'	126°32'	26.8	60.9	72.6	98.1	46.1	41.2	51.2
용연(RYONGYON)	38°12'	124°53'	48.1	102.4	119.6	136.1	72.9	84.7	111.7
해주(HAEJU)	38°02'	125°42'	40.9	88.4	103.8	104.9	60.6	79.8	115.2
개성(KAESONG)	37°58'	126°34'	33.0	70.4	82.8	88.2	57.0	63.0	75.2
평양(PYONGGANG)	38°24'	127°18'	29.3	66.9	79.8	96.2	50.3	57.3	62.0

양의 에너지를 얻을 것으로 보인다(Table 1). 풍력밀도의 전체적인 분포는 풍속 분포와 비슷하지만 주변과의 상대적인 크기의 차이는 상당히 다를 수 있다. 풍력밀도는 (8)에 의해 풍속의 세제곱에 비례하므로 높은 풍속을 나타낸 곳에서 에너지 밀도는 매우 높게 나타난다. 예를 들면, 30년 평균 풍속이 가장 큰 두 지점인 장진과 용연의 경우 4.7 m/s과 4.1 m/s로 약 20% 미만의 차이가 있었다. 반면에 30년 평균 풍력밀도를 보면 각각 151.2 W/m^2 과 102.4 W/m^2 로 두 지점 사이의 풍력밀도 차이는 약 50%를 보이고 있다(Table 1). 따라서 풍력밀도는 풍속의 수평적 분포보다 매우 큰 수평적 경도를 보인다(Fig. 3). 특히 내륙 중심부의 개마고원 지역에서 뚜렷이 높은 풍력밀도를 나타냈으며, 함경북도 동북부, 평안도 남서 해안, 황해도 해안 근처에서 비교적 높은 풍력밀도를 나타냈다. 전체적으로 동해안보다 서해안

지역에서 높은 풍력밀도를 보임에 따라, 대륙풍이 잘 발달한 서해안에 해상 풍력발전소를 건립하는 것이 유리할 것으로 보인다.

장진은 개마고원에 위치하며 해발 고도가 1100 m로 연평균 풍속이 4.7 m/s이며, 풍력밀도는 151.2 W/m^2 에 달하였다. 바람장미를 통한 이 곳의 주풍향을 분석한 결과 여름 동안은 남풍이, 나머지 계절 동안은 북서풍이 탁월하게 발달되어 있는 것으로 알려져 있다(서은경 외, 2009). 이 곳의 지형적 특징은 개마고원 일대로 낭림산줄기, 연화산줄기와 백두대산줄기가 만나는 곳이다. 낭림산줄기와 연화산줄기 사이의 통로에 장진이 위치하며, 그 뒤에는 백두대산 줄기가 자리잡고 있다. 따라서, 북쪽의 광활하고 높은 고도의 대륙에서 불어오는 강한 북서풍의 계절풍이 이 통로를 따라 불면서 뒤쪽의 백두대산 줄기에 막혀 바람이 집중되는 것으로 보인다. 따라서 장진 지역

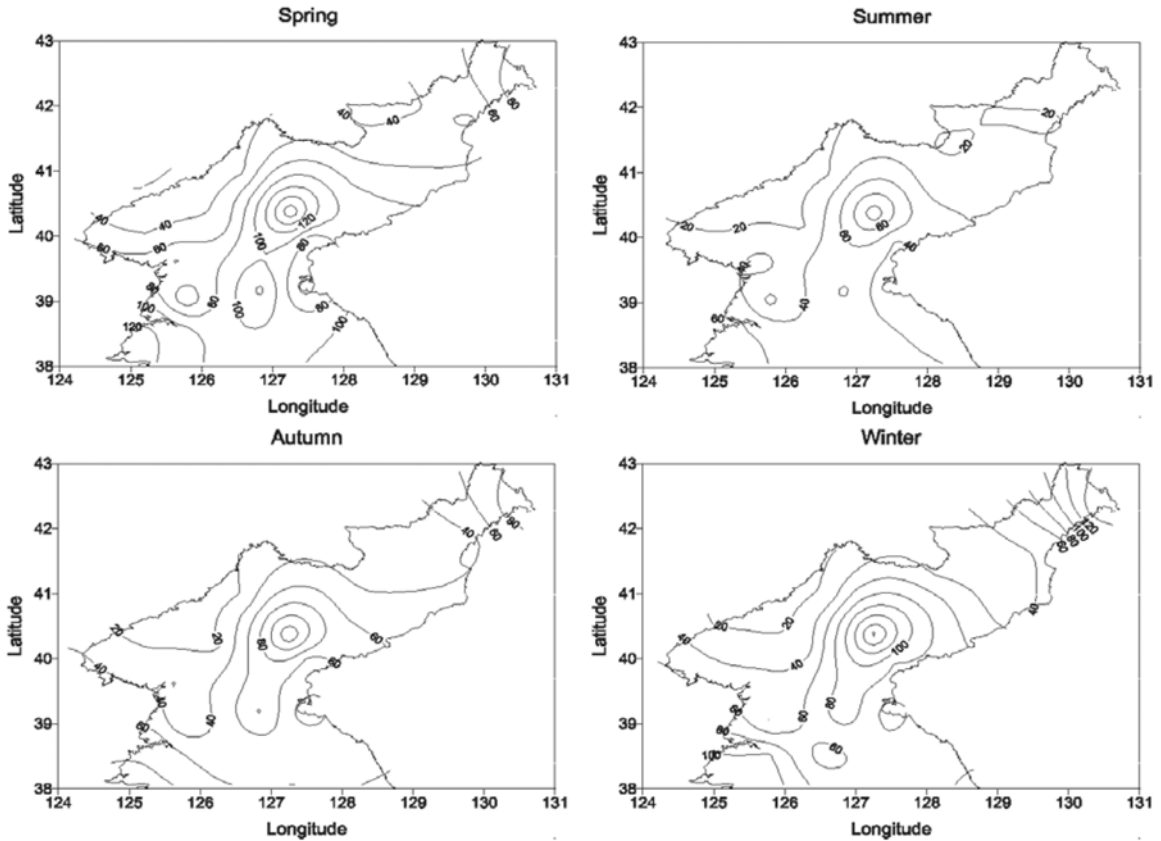


Fig. 4. Spatial distribution of seasonal mean wind power density (W/m^2) at 50 m altitude above ground.

주변은 북한의 어느 지역보다도 풍력자원이 월등히 풍부한 곳으로 분석되었다. 그 밖에 좋은 풍력자원을 갖는 지역은 선봉, 양덕, 남포, 용연, 해주 등을 들 수 있다. 이들 다섯 지역의 풍력밀도의 크기는 약 $84-103 W/m^2$ 정도이다.

양덕은 평안남도 동부에 위치하며, 동·남·북의 세 방면이 산맥으로 둘러싸고 있다. 따라서 서쪽과 북서 방향으로 넓게 트인 낮은 지형이 자리잡고 있어, 남동풍이 주풍향인 여름을 제외한 모든 계절 동안 비교적 강한 북서풍이 막힘 없이 불어올 수 있는 지리적 환경을 지니고 있다(서은경 외, 2009). 남포는 평안남도 남서부의 대동강 하구에 자리잡고 있으며, 서해와 대동강의 영향을 받아 다른 지역과는 달리 다양한 방향으로부터의 바람이 존재한다. 주로 서풍과 동풍이 우세하며, 겨울에는 북서풍의 바람이 비교적 자주 분다.

선봉은 두만강 유역과 동해안으로 갈수록 고도가 급격히 낮아져 평야가 발달해 있는 함경북도의 동북

부 해안에 위치한다. 선봉은 계절에 따라 북서풍과 남동풍이 6개월 간격으로 주풍향을 보이며, 1년 중 약 4개월 동안 $5 m/s$ (고도 $80 m$) 이상의 바람이 지속적으로 부는 곳이다(서은경 외, 2009). 황해도 서부 해안에 위치한 용연은 불타산줄기의 끝 자락에 위치하면서 해안에 인접해 있어 해풍에 의한 바람의 활용이 가능한 지역이다. 이 곳의 연평균 풍력밀도는 $100 W/m^2$ 보다 큰 값을 보였다. 또한 남포지역과 비슷한 환경으로 해륙풍에 의한 영향으로 사계절 모두 다양한 풍향의 바람을 보이고 있다.

황해도의 남서부 해안에 위치한 해주는 높이 $600 m$ 정도의 산들이 북쪽을 병풍처럼 둘러싸고 있으면서, 북서방향으로 비교적 트인 지리적 환경을 갖고 있다. 겨울에는 차가운 바람을 막아주어서 해양성 기후의 특성을 갖고 있다. 이 곳은 비교적 다양한 풍향의 바람을 갖고 있지만, 겨울에는 북서풍의 바람이 주로 분다(서은경 외, 2009).

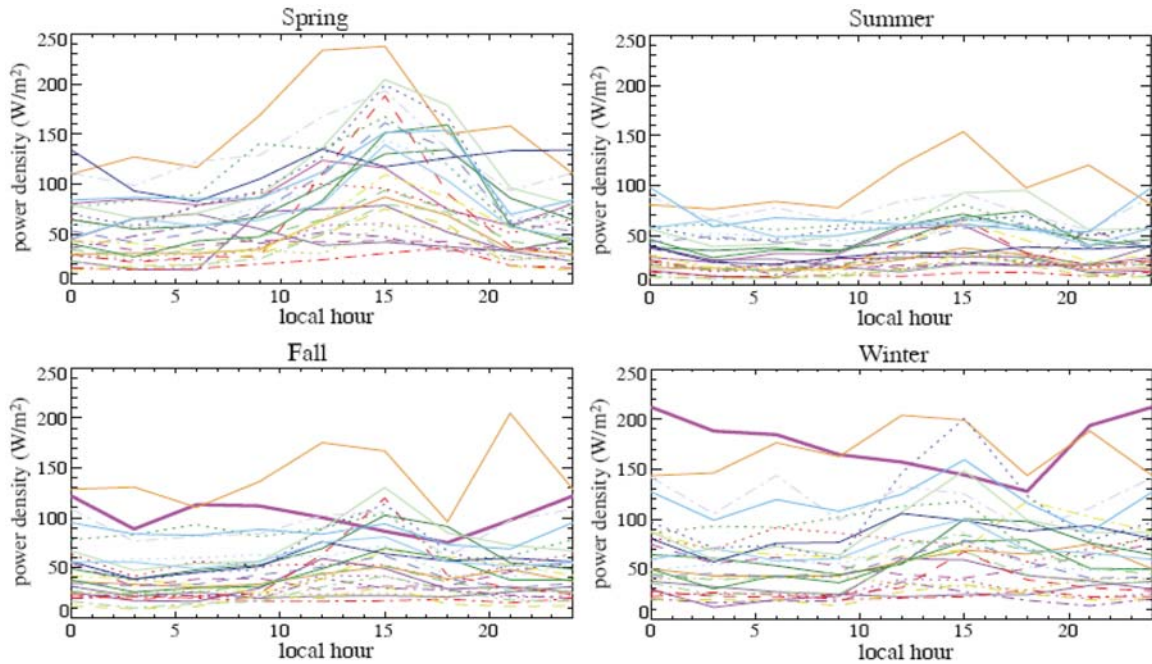


Fig. 5. Diurnal variation of wind power density (W/m^2) for 27 meteorological stations at 50 m altitude above ground. Each line denotes one of the meteorological stations. Thick solid lines in fall and winter correspond to Senbong.

계절별 평균 풍력밀도와 일변화

북한지역의 27개 관측지점에서의 50 m 고도에서의 계절별 평균 풍력밀도를 Table 1에 정리하였다. 50 m 고도에서 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 78.2, 39.1, 50.8, 66.4 W/m^2 의 평균 풍력밀도를 나타냈다. 겨울보다 봄에 평균 풍속이 높게 나타났으며, 이에 따라 풍력밀도도 봄에 높게 나타났다. 각 계절별 평균 풍력에너지의 전체적 분포는 연평균 풍력밀도의 분포와 비슷하지만 풍력밀도의 수평적 경도는 봄에 가장 강했으며, 여름에 가장 약한 경도를 보였다(Fig. 4).

장진은 50 m 고도에서 봄에 177.8 W/m^2 로 에너지 밀도가 가장 높게 나타났으며, 여름에는 114.7 W/m^2 의 가장 낮은 에너지 밀도를 나타냈다. 장진의 특징 중의 하나는 여름의 장진이 다른 어느 지역의 봄 동안의 풍력밀도보다 크게 나타난다는 것이다. 따라서 장진은 사계절 모두 풍력에너지를 생산할 수 있는 곳으로 보인다(Table 1). 양덕은 50 m 고도에서 봄에 평균 풍력밀도가 125.3 W/m^2 로 가장 높게 나타났으며, 여름에 평균 풍력밀도는 63.5 W/m^2 로 가장 낮게 나타났다 (Table 1). 이 곳은 봄과 여름의 풍력밀도의 차가 매우 크게 나타났다. 선봉의 풍력밀도는 50 m 고도에서 봄, 여름, 가을, 겨울 동안 각각 92.7, 39.6,

92.8, 158.5 W/m^2 이다. 특히 풍력에너지가 겨울에 대부분 집중되어 있는 분포를 가지며, 여름의 풍력에너지가 겨울의 약 25%에 해당된다. 남포는 계절적으로 봄에 가장 높은 풍력밀도인 114.8 W/m^2 를 나타냈으며, 여름에 가장 낮은 60.7 W/m^2 의 풍력밀도를 보였다. 용연의 경우에는 봄에 가장 높은 풍력밀도를 보였지만, 해주에서는 겨울에 가장 높은 풍력밀도를 보였다.

27개 지점에서 계절에 따른 풍력밀도의 일변화를 Fig. 5에 나타내었다. 거의 모든 27개 지점이 오후에 비교적 높은 풍력밀도와 오전 3-6시 경에 낮은 풍력밀도를 보였으며, 오후 동안의 풍력밀도의 증가가 뚜렷이 나타났다. 풍력밀도 일변화의 진폭이 봄에 가장 큰 값을 보였다. 겨울도 가을과 여름보다는 비교적 큰 진폭을 나타냈으며, 여름에 가장 작은 진폭을 보였다. 한편 선봉의 경우에는 겨울 동안 야간에 보다 높은 풍력밀도를 보였다. 가을과 겨울 동안의 일변화에서 밤 동안의 비교적 강한 바람은 이 지역의 주변 지형과 주풍의 영향으로 보인다. 즉, 북서방향에 위치한 산사면을 따라 부는 산풍과 뚜렷한 북서풍의 주풍이 합쳐져 나타나는 것으로 보인다.

Table 2. Wind speed, power density, and power class [Khan and Iqbal (2004)]

Wind power class	10 m height		50 m height	
	Mean annual wind speed (m/s)	Wind power density (W/m ²)	Mean annual wind speed (m/s)	Wind power density (W/m ²)
1	0.0-4.4	0-100	0.0-5.6	0-200
2	4.4-5.1	100-150	5.6-6.4	200-300
3	5.1-5.6	150-200	6.4-7.0	300-400
4	5.6-6.0	200-250	7.0-7.5	400-500
5	6.0-6.4	250-300	7.5-8.0	500-600
6	6.4-7.0	300-400	8.0-8.8	600-800
7	7.0-9.4	400-1000	8.8-11.9	800-2000

풍력 등급

풍력을 이용한 전기 생산을 위한 자원의 등급은 크게 7개의 등급으로 나누어진다(Elliot et al., 1986). Table 2는 각 등급에 따른 풍속과 풍력밀도의 범위를 보여준다. 1등급의 경우에는 계통연계형(grid-connected) 적용을 위한 좋은 환경이 아니며 연계가 없는 축전과 같은 전기 유형에 적합하다(Celik, 2003). 즉, 현재의 기술 수준에서 전기를 생산하는데 소요되는 비용에 비해 풍력발전에 의한 에너지 획득의 효과가 적은 것으로 알려져 있다. 반면에 3-4등급의 경우 가정용 발전을 위해 작은 규모의 풍력 터빈을 효과적으로 이용할 수 있다(Nyouky, 2009). 4-7등급의 경우 대량의 전기 생산을 위해 좋은 환경으로 알려져 있다.

이 기준에 의하면 북한 전 지역의 10 m 고도에서의 풍력자원은 1등급에 속한다. 물론 이 결과는 지상 관측소 27개 지점을 기초로 한 것이기 때문에 가능성 있는 주변 지역을 더욱 상세히 조사해볼 경우 풍력자원의 등급이 상향될 여지가 있다. 50 m 고도에서 장진과 용연은 각각 3등급과 2등급으로 상향된다. 80 m 고도에서는 선봉, 양덕, 용연, 해주가 1등급에서 2등급으로 변하며, 장진은 3등급으로 상향된다. 따라서 장진 지역의 경우에는 50 m 고도에서 봄과 겨울 동안 3등급, 가을에는 3등급에 가까운 풍력밀도를 보였다. 선봉은 특히 겨울 동안의 풍력밀도가 3등급에 해당했다. 이 정도의 풍력에너지는 가구들을 위한 전기발전을 충분히 지원할 수 있는 풍력자원이다.

결 론

본 연구는 북한 지역의 전체적인 풍력 특성을 파악하기 위하여 각 도에 골고루 분포하고 있는 27개 관측소의 30년 관측 바람 자료를 사용하였다. 이 분

석을 통해 북한 관측소들의 바람 자료들은 무풍을 많이 포함하고 있음을 알 수 있었지만 이 바람 자료에 대해서는 양질의 검사를 수행할 수 없는 상황이었다. 하지만 30년간의 장기간의 자료를 사용함으로써 무작위 오차를 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 정량적 분석 결과는 북한자료의 불확실성을 포함할 수 있음을 예상할 수 있다.

북한 전 지역에서의 고도 50 m에서 연평균 풍력밀도는 58.6 W/m²이었다. 북한 전 지역의 풍력밀도 분포는 내륙 중심부의 개마고원 지역에서 뚜렷이 높은 값을 보였으며, 함경북도 동북부, 평안도 남부 해안, 황해도 해안 근처에서 비교적 높은 값을 나타냈다. 전체적으로 동해안보다 서해안 지역에서 높은 풍력밀도를 보임에 따라, 대륙붕이 잘 발달한 서해안에 해상 풍력발전소를 건립하는데 있어서 유리할 것으로 보인다.

각 계절별 평균 풍력에너지의 전체적 분포는 연평균 풍력밀도의 분포와 비슷하지만 풍력밀도의 수평적 경도는 봄에 가장 강했으며, 여름에 가장 약한 경도를 보였다(Fig. 4). 겨울보다 봄에 평균 풍력밀도가 10% 이상 높게 나타났으며, 여름은 봄의 50% 정도의 에너지밀도를 나타냈다. 풍력밀도의 일변화를 보면 거의 모든 27개 지점이 오후에 비교적 높은 풍력밀도와 오전 3-6시 경에 낮은 풍력밀도를 보였다. 풍력밀도 일변화의 진폭이 봄에 가장 컸으며, 여름에 가장 작은 값을 보였다.

장진은 연평균 151.2 W/m²를 나타냈으며, 그 밖에 선봉, 양덕, 남포, 용연, 해주 등이 약 83-103 W/m²의 크기를 보였다. 장진에 설치된 회전자의 단면적 40 m²의 풍력발전기 1대를 사용하여 한 달 동안 발전할 경우 약 4350 kWh의 에너지를 만들 수 있게 된다. 이

양은 가구 당 월 평균 전력 사용량이 200-300 kWh라 할 때 15-22 가구를 지원할 수 있는 용량이다.

특히 풍력밀도는 풍속의 세제곱에 비례하므로 조그만 풍속의 차이가 풍력밀도의 높은 차이를 가져오기 때문에 풍속의 수평적 분포와는 달리 풍력밀도는 높은 수평적 경도를 보였다. 따라서 풍력발전소 선정을 위해 특별 관측을 실시할 경우 선정 주변 지역을 상세하게 관측할 필요가 있다.

사 사

이 연구에서 사용한 북한 지역의 지상관측자료는 기상청으로부터 제공되었습니다. 북한 지역의 풍력 연구에 대한 동기를 심어주신 이영이 연구원에게 감사드립니다. 이 연구는 기상지진기술개발사업단(CATER 2009-2108)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 2003, 한반도 해역의 해상 풍력자원 평가. 한국태양에너지학회 논문집, 23, 35-41.
 고경남, 허종철, 2007, 풍력공학입문. 문운당, 서울, 252 p.
 기상청, 2007, 풍력자원지도 개발 연구 보고서. 기상청자료 관리서비스팀, 11-1360000-000355-14, 102 p.
 김건훈, 경남호, 김은일, 장문석, 배재성, 김석우, 김성완, 김홍우, 주영철, 하중호, 윤정은, 2005, 풍력자원 정밀조사 및 풍력단지 개발 기술 증진 연구. 한국에너지기술연구원 보고서, KIER-A44322, 504 p.
 김도우, 변희룡, 2008, 한반도 바람자원의 시공간적 분포. 대기지, 18, 171-182.
 김현구, 최재우, 2002, 풍력에너지 이용 및 개발 현황. RIST 연구논문, 16, 479-485.
 김현구, 이화운, 정우식, 2005, 한반도 바람지도 구축에 관한 연구 I. 원격탐사자료를 이용한 해상풍력자원 평가. 한국대기환경학회지, 21, 63-72.
 김현구, 장문석, 이화운, 김동혁, 최현정, 2006, 수치바람모의에 의한 저해상도 국가 바람지도의 구축. 한국태양에너지학회 논문집, 26, 31-38.
 박경호, 김건훈, 조덕기, 전홍석, 1994, 국내의 풍력자원 분포특성분석. 한국에너지공학학회지, 3, 187-192.
 서은경, 윤준희, 박영산, 2009, 북한 지역에서의 30년 동안의 평균 바람 지도. 한국지구과학회지, 30, 845-854.
 손충렬, 2006, 북한과학기술연구. 한국과학기술정보연구원 북한과학기술네트워크, 4, 109-124.
 윤재욱, 김명래, 2008, 대학교 캠퍼스의 풍력자원 측정 및 분석. 한국생태환경 건축학회 논문집, 8, 19-24.
 이민식, 2008, 세계 풍력발전산업의 동향 및 전망. 산업은행조사월보, 626, 97-107.

이유진, 이강준, 윤지훈, 장주영, 2007, 남북에너지 협력방안 연구-재생가능에너지를 중심으로. 2007년도 국회 연구용역 과제 보고서, 120 p.
 이은정, 조일성, 허철운, 김태룡, 이동일, 김영신, 2008, 기상정보를 활용한 풍력자원지도 개발 연구. 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 332-333.
 장문석, 2008, 신재생에너지 백서. 지식경제부, 3, 294-316.
 장용훈, 2005, 北, 교토의정서 가입 배경과 전망. <http://news.naver.com> (검색일: 2009. 6. 10)
 조동호, 고일동, 김상기, 김상훈, 김은영, 이은경, 2007, KDI 북한경제리뷰. 한국개발연구원, 85 p.
 Celik, A.N., 2003, A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. Renewable Energy, 29, 593-604.
 Elliot, D.L., Holladay, C.G., Barchet, W.R., Foote, H.P., and Sandusky, W.F., 1986, Wind energy resource Atlas of the United States. Solar Energy Research Institute (now the National Renewable Energy laboratory). Golden, Colorado. Available online, <http://redc.nrel.gov/wind/pubs/atlas>.
 Jewer, P., Iqbal, M.T., and Khan, M.J., 2005, Wind energy resource map of labrador. Renewable Energy, 30, 989-1004.
 Khan, M.J. and Iqbal, M.T., 2004, Wind energy resource map of Newfoundland. Renewable Energy, 29, 1211-1221.
 Nyouky, P., 2009, A feasibility study on wind energy resource for utility-scale application: A case analysis from Greater Banjul Area, The Gambia. A Master's Thesis, National Central University in Taiwan, 88 p.
 Panofsky, H., 1973, Tower micrometeorology. Workshop on Micrometeorology, American Meteorological Society, 151-176.
 Panofsky, H.A. and Dutton, J.A., 1984, Atmospheric turbulence. John Wiley and Sons, NY, USA, 397 p.
 Stevens, M.J. and Smulders, P.T., 1979, The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, Wind Engineering, 3, 132-145.
 Weisser, D. and Foxon, T.J., 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.
 Zhang, S.F., 1981, A statistical analysis of the power law and the logarithmic law using wind data from a 164 m tower. Boundary-Layer Meteorology, 20, 117-123.

2010년 3월 15일 접수
 2010년 5월 3일 수정원고 접수
 2010년 5월 24일 채택