

# 제주 서광지역에 대한 풍력에너지의 장기간 (10년) 특성

고경남\*, 김경보\*\*, 허종철\*\*\*

\*제주대학교 청정에너지실증연구센터(gnkor2@cheju.ac.kr),

\*\*제주대학교 기계공학과 대학원(kbkim@kma.go.kr),

\*\*\*제주대학교 기계에너지시스템공학부(jchuh@cheju.ac.kr)

## Characteristics of Wind Energy for Long-term Period (10 years) at Seoguang Site on Jeju Island

Ko, Kyung-Nam\*, Kim, Kyoung-Bo\*\*, Huh, Jong-Chul\*\*\*

\*Test & Evaluation Research Center for Clean Energy Development, Cheju National University(gnkor2@cheju.ac.kr),

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate school, Cheju National University(kbkim@kma.go.kr),

\*\*\*Faculty of Mechanical Energy System Engineering, Cheju National University(jchuh@cheju.ac.kr)

### Abstract

In order to clarify characteristics of variation in wind energy over a long-term period, an investigation was carried out at Seoguang site on Jeju island. The wind data for 10 years from Automatic Weather System (AWS) were analyzed for each year. The variation in the annual energy production (AEP) for the 2 MW wind turbine was estimated through statistical work. The result shows that the range of the yearly average wind speed at 15 m above ground level for 10 years was from -22.6% to +13.7%, which is wider range than that in Japan. The coefficient of variation for the AEP was 22.7%, which is about twice of that for the yearly average wind speed. Therefore, for estimating the wind energy potential accurately at a given site, the wind data should be analyzed over a long-term period based on the data from the meteorological station.

Keywords : 풍력에너지 (Wind energy), 풍력자원 (Wind resource), 와이블 분포(Weibull distribution), 연간 발전량 (Annual Energy Production; AEP), 설비 이용률(Capacity Factor; CF)

### 기 호 설 명

$c$	와이블 분포의 척도계수 (m/s)	$P_w(V)$	풍속 $V$ 에서의 출력 (kW)
$c.v.$	분산계수	$p(V)$	$V$ 에서의 와이블 분포 값
$k$	와이블 분포의 형상계수	$s$	표본평균의 표준편차
$\bar{P}$	평균 풍력발전기 출력 (kW)	$n$	표본의 크기
		$V$	보정 평균풍속 (m/s)
		$V_a$	측정 평균풍속 (m/s)

투고일자 : 2008년 5월 16일, 심사일자 : 2008년 5월 18일, 게재확정일자 : 2008년 6월 24일

교신저자 : 고경남(gnkor2@cheju.ac.kr)

$\bar{y}$	표본평균의 평균
$Z$	보정하고자 하는 높이 (m)
$Z_a$	측정 높이 (m)
$Z_g$	기하평균높이 (m)
$Z_0$	표면거칠기길이 (m)
$\alpha$	역지수
$\mu$	모평균

## 1. 서론

지구온난화에 따른 기상이변과 점차 다가오는 화석연료의 고갈이 전 세계인의 관심사가 되면서 친환경적이면서 지속가능한 에너지 개발은 각 국가마다 선택이 아닌 필수가 되고 있다. 그 중 풍력에너지 기술은 19세기 후반부터 덴마크를 중심으로 연구되어 오다가 현재는 유럽각국, 미국, 일본 등이 기술 개발 및 풍력발전기 보급에 박차를 가하고 있다.

향후 2012년까지 세계적으로 풍력산업이 매년 평균 20.7%씩 증가할 것으로 예상되고 있고, 풍력발전설비의 설치용량이 가장 빠르게 증가될 국가로는 미국과 중국이 될 것으로 전망하고 있다<sup>1)</sup>. 2006년 말 현재 세계의 풍력발전설비 용량은 74,360 MW이고, 우리나라는 175 MW이다<sup>2)</sup>. 2012년까지 정부는 2,250 MW의 풍력발전설비를 보급할 목표로 정책을 추진하고 있는 것을 감안하면<sup>2)</sup>, 2006년 말 현재의 풍력발전설비 용량의 12배 이상을 보급하는 것이 된다. 2008년 현재 약 34 MW의 풍력발전기가 보급되어 있는 제주도에서도 2020년까지 육해상에 풍력발전기를 총 500 MW 설치한다는 계획을 최근에 발표했다.

우리나라는 지금까지 주로 외국산 풍력발전기를 수입하여 설치해왔지만, 최근 몇몇 회사들은 국산 기종 개발에 성공하여 실증운전 중이거나 최근 형식인증을 받은 곳도 있다. 국산 풍력발전기 개발 시 우리나라의 바람과 지형에 적합하게 설계하는 것이 무엇보다 중요하다. 그러기 위해서는 우리나라의 바

람데이터를 보다 심도 있게 분석하여 그 특성을 명확히 해야 할 것이다.

일반적으로 바람은 해마다 약간의 변동을 일으키는 것으로 알려져 있다. 그러나 한국에서는 실제로 장기간에 걸친 풍력에너지 변동을 분석한 예가 별로 없다. 특히 풍력발전사업자에게는 해에 따른 발전량 변화 예측은 매우 중요하다. 따라서 이 논문에서는 기상학적으로 준평년값에 해당하는 10년간의 바람데이터를 분석하였다. 기상청의 자동기상관측장비(AWS)에서 수집한 바람데이터를 이용하였고, 해당 지점에 가상의 풍력발전기를 세웠을 때 해마다 어느 정도의 발전량 변화를 보이는지 분석하였다.

## 2. 연평균풍속 및 연평균 풍력밀도의 변동

바람데이터를 취득한 곳은 그림 1에 나타난 바와 같이 제주특별자치도 서귀포시 서쪽편 중산간에 위치한 서광지역(해발고도 146m)이다. AWS는 건물 2층 옥상에 설치되어 있으며 지상으로부터 풍향풍속계까지의 높이는 약 15m이다. AWS 주변에 주로 단층 건물들과 수목이 듬성듬성 들어서 있고 다시 그 주위는 목장과 수풀로 둘러싸인 교외마을이다. AWS로부터 취득한 장기간 바람데이터 중 1997년부터 2006년까지 10년 동안의 데이터를 해에 따라 분석하였다.

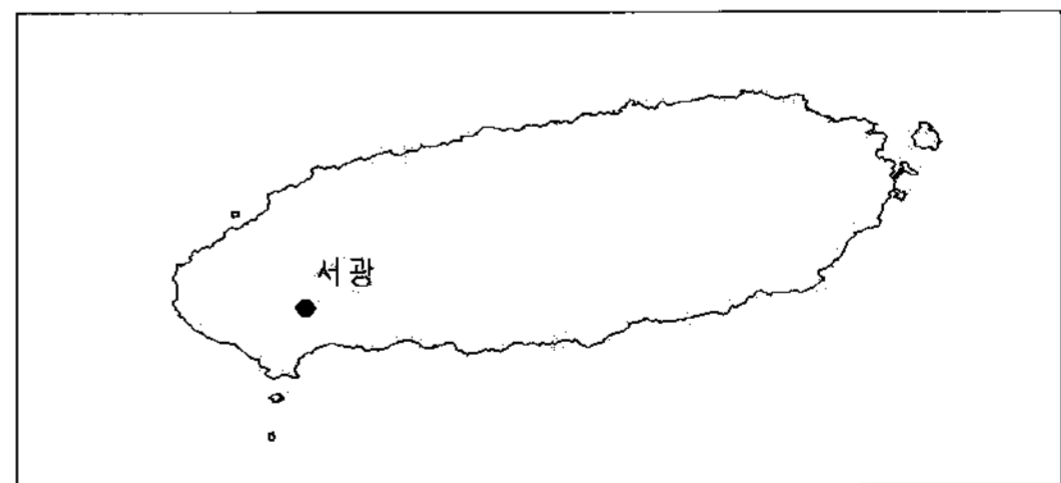


그림 1. 장기간 바람 데이터 수집 지역

표 1은 연별 수집된 바람데이터의 개수를 나타낸다. AWS는 한 시간에 하나의 바람데이터를 저장하므로 1년에 해당하는 8760개의

데이터가 수집되어야 한다. 그러나 기기고장 또는 오작동으로 인한 데이터는 제외하였으므로, 그 보다 조금 적다. 표에서 1년 중 바람이 전혀 불지 않았던 시간도 같이 나타내었다. 데이터 수집률은 평균 97.4%이고 바람이 불지 않았던 시간은 평균 1.3%임을 알 수 있다.

표 1. 연별 수집된 바람데이터 개수

년도	데이터 개수	풍속이 '0 m/s'인 데이터 개수
1997	7828	50
1998	8110	118
1999	8509	32
2000	8673	43
2001	8723	95
2002	8737	124
2003	8714	192
2004	8758	355
2005	8694	29
2006	8536	65
평균	8,528	110
수집률	97.4%	1.3%

지상으로부터 15m 높이에서의 연별 평균 풍속 및 연별 평균풍력밀도의 변동 상황을 그림 2에 나타낸다. 그림으로부터 해에 따라 풍력에너지가 변동하고 있음을 확인할 수 있다. 1999년과 2004년에 매우 낮은 연평균풍속 및 연평균풍력밀도를 보이는 반면, 2000년과 2002년에는 그 값들이 매우 높다. 참고로 10년간 평균풍속 및 평균풍력밀도는 각각 3.25 m/s 및 50.2 W/m<sup>2</sup>이었다. 10년간 평균 풍속에 대한 각 연평균풍속의 변동범위는 -22.6% 에서 +13.7%였다.

비교연구를 위하여 서광지역에서 북북서쪽 방향으로 약 13km 떨어진 한림지역에서의 연별 평균풍속을 그림 3에 나타낸다.<sup>3)</sup> 비록 연별 평균풍력밀도는 제시되지 않았지만, 그림 2와 같이 해에 따라 연평균풍속이 변동하고 있음을 볼 수 있다. 10년간 평균풍속은 서광지역 보다 다소 높은 3.57 m/s이고, 각 연평균풍속의 변동범위는 -21.6% 에서 +17.6%

로 서광지역 보다 변동 폭이 약간 크다. 한림 지역의 결과로부터 서광지역이 제주도의 다른 지역과 달리 특별히 연평균풍속의 변동범위가 넓다고는 할 수 없다고 생각된다.

일본에서의 연구결과에 따르면, 30년 동안 연평균풍속의 변동범위는 ±10% 이내였다<sup>4)</sup>. 이 연구에서는 10년 동안 데이터를 분석했음에도 불구하고 더 넓은 변동범위를 보였다. 따라서 풍력발전사업을 위한 풍력자원조사를 보통 1년간 실시하여 해당 지역의 사업가능성을 판단하는 것은 문제의 소지가 있으며, 반드시 근처 기상관서에서 얻어진 장기간 바람데이터를 기초로 보정하여 판단해야 할 것이다.

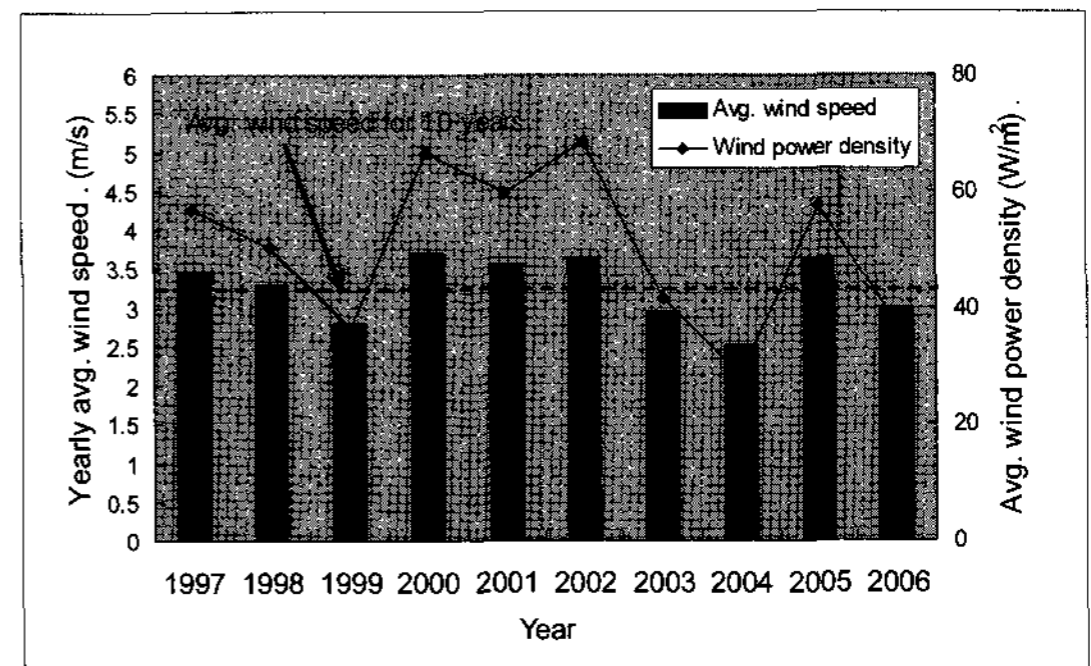


그림 2. 지상으로부터 15m 높이에서의 연별 평균풍속 및 평균풍력밀도 (서광지역)

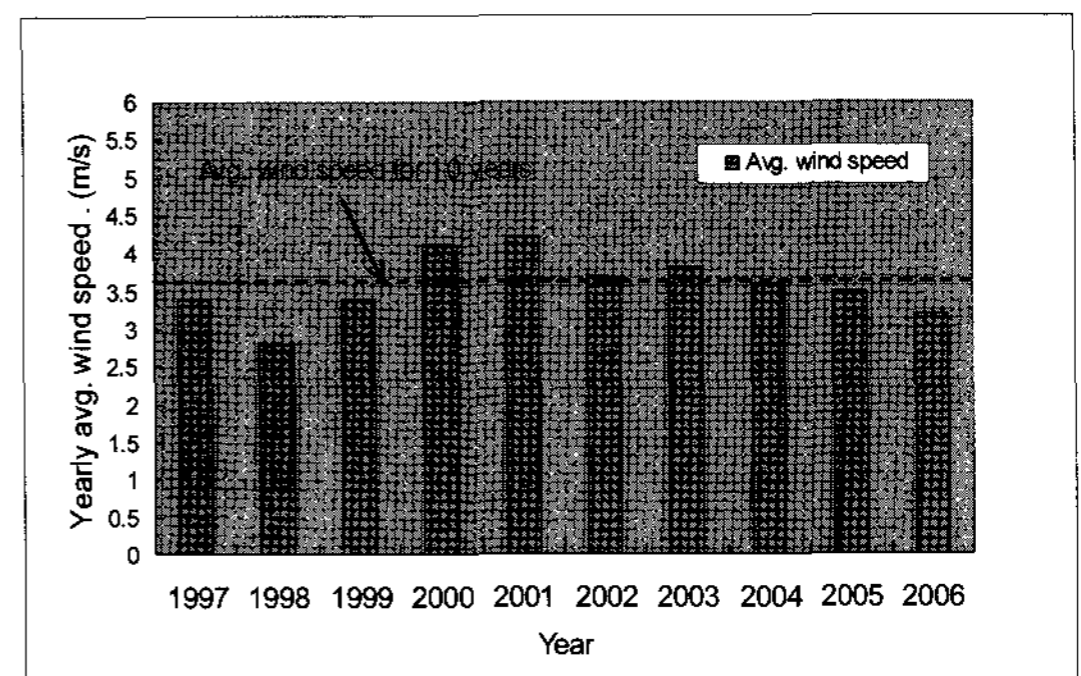


그림 3. 지상으로부터 15m 높이에서의 연별 평균풍속 (한림지역)<sup>3)</sup>

표 2는 지상으로부터 15m에서의 바람 데이터를 기초로 70m높이로 보정한 후 와이블

분포에 적합(fitting)시킨 바람데이터의 특성 값을 나타낸다. 실제 데이터와 적합시킨 데이터와의 차는 2.4% 미만이었다. 높이 15m에서 측정된 바람데이터를 70m로 보정하여 바람 특성 값 및 연간 발전량을 예측하면 오차가 커질 수 있지만, 이 연구의 목적인 풍력 에너지의 해에 따른 변동특성은 파악할 수 있다고 생각된다. 풍력발전기의 대형화 추세에 따라 허브높이 70m에서의 바람데이터를 얻기 위하여 수정된 멱법칙(modified power law)<sup>5)</sup>을 적용하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$V = V_a (Z/Z_a)^\alpha \quad (1)$$

여기서,  $V_a$  및  $Z_a$ 는 측정된 풍속 및 풍속계의 설치높이이고,  $V$  및  $Z$ 는 보정풍속 및 보정하고자 하는 높이이다.  $\alpha$ 는 아래 식에 의해 결정되는 멱지수이다.

$$\alpha = \frac{1}{\ln(Z_g/Z_0)} - \frac{0.0881 \ln(V_a/6)}{1 - 0.0881 \ln(Z_a/10)} \quad (2)$$

여기서,  $Z_g = \sqrt{Z_a \times Z}$ 로 구할 수 있고, 기하평균높이(geometric mean height)라고 한다. 또한  $Z_0$ 는 지표상태에 따르는 표면거칠기길이(surface roughness length)이다. 이 연구에서  $Z_0$ 는 서광지역의 지형에 적당하다고 생각되는 0.5m를 선택하였다.

표에서 연평균풍속은 3.98 m/s에서 5.52 m/s까지 비교적 넓은 범위에 걸쳐 변동하고 있음을 알 수 있다. 10년간 평균풍속은 4.96 m/s이고, 이에 대한 연평균풍속의 변동범위는 -19.8%에서 +11.2%였다. 또한 연평균풍속의 분산계수는 11.1%였다. 분산계수(coefficient of variation) c.v.는 다음 식으로 구하였다.

$$c.v. = \frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \quad (3)$$

평균풍력밀도는 153.59 W/m<sup>2</sup>로 예상되었

다. 또한 와이블 분포함수에서 척도계수  $c$  및 형상계수  $k$ 의 해에 따른 변동 값도 풍력 단지설계 프로그램인 WAsP을 이용하여 구한 후 표에 같이 나타내었다.

표 2. 높이 70m로 보정된 바람데이터 특성 값

년	c (m/s)	k	연평균 풍속 (m/s)	풍력밀도 (W/m <sup>2</sup> )	연평균 풍속의 변동범위 (%)	연평균 풍속의 분산계수 (%)
1997	5.9	1.96	5.25	173.19	-19.8 ~ +11.2	11.1
1998	5.7	1.93	5.04	155.07		
1999	4.8	1.68	4.3	113.57		
2000	6.2	1.98	5.52	198.54		
2001	6	1.99	5.36	181.11		
2002	6.1	1.9	5.45	199.27		
2003	5.2	1.77	4.59	128.92		
2004	4.5	1.65	3.98	91.97		
2005	6.2	2.23	5.5	176.32		
2006	5.2	1.99	4.64	117.89		
평균	5.58	1.91	4.96	153.59		

### 3. 와이블 분포 및 바람장미

10년 동안의 와이블 분포가 각 1년씩 구하여졌다. 그림 4는 1997년부터 2001년까지 연별 와이블 분포를 나타낸다. 연평균풍속이 낮은 1999년의 와이블 분포곡선이 가장 왼쪽으로 치우쳐 있는 반면, 연평균풍속이 큰 2000년에는 가장 오른쪽으로 곡선이 기울어져 있다.

그림 5는 2002년부터 2006년까지 연별 와이블 분포를 보여준다. 그림 4와 같이 연평균풍속이 낮은 2004년의 곡선이 가장 왼쪽으로 기울어져 있으나, 그 다음 해인 2005년에는 높은 연평균풍속으로 인하여 가장 오른쪽으로 풍속이 분포하고 있다. 그림 5의 와이블 분포곡선이 그림 4보다 더 그 형태가 변동하고 있다. 그림 4와 5로부터 와이블 분포 곡선도 해마다 약간씩 다른 형태를 갖는 것을 알 수 있다.

연별 바람장미의 변동을 그림 6에 나타낸다. 제한된 지면관계상 1997년부터 2006년 까지 3

년 간격으로 나타내었다. 1997년, 2000년, 2003년의 바람장미로부터 북풍계열 바람이 주풍향을 알 수 있다. 만약 이 지역에 풍력발전단지를 건설한다면, 좋은 조건이라 할 수 있다. 그러나 2006년의 바람장미는 주풍향이 뚜렷하다고 할 수 없다. 풍력발전단지 설계 시 풍향은 매우 중요한 설계인자이다. 따라서 1년 동안의 풍향 데이터에 근거하여 단지설계를 한다면, 비효율적으로 설계 할 수 있으므로, 반드시 장기간 바람 데이터를 분석한 후, 그 결과를 고려하여 단지설계가 이루어져야 할 것이다.

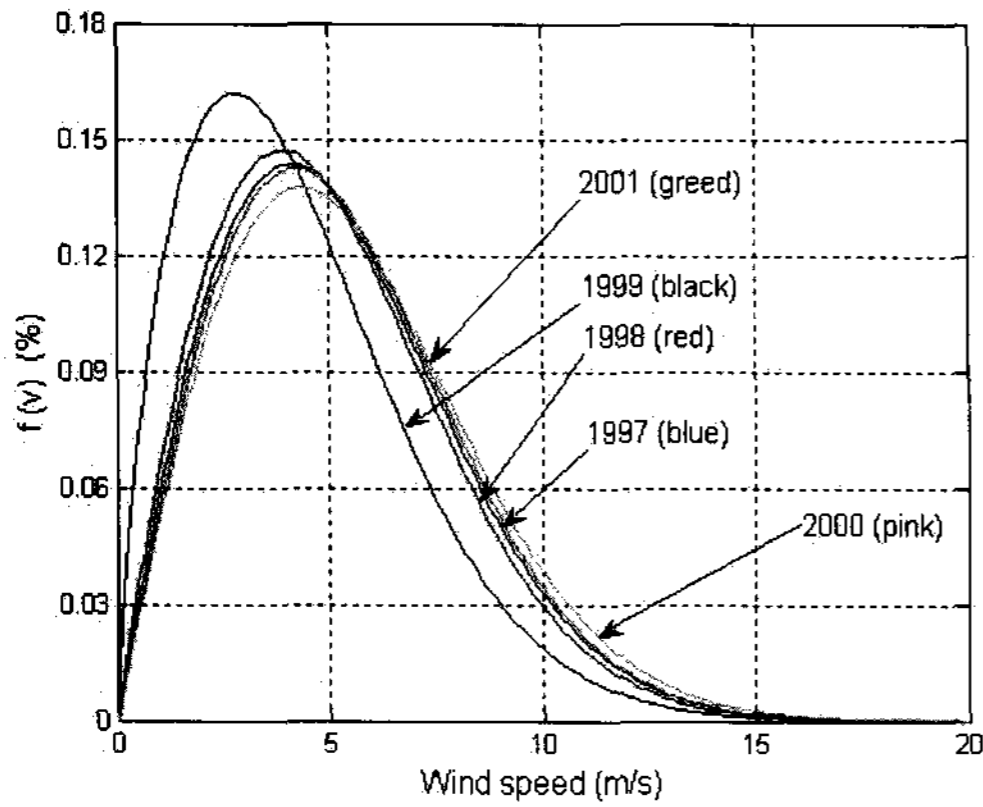


그림 4. 연별 와이블 분포 (1997년 ~ 2001년)

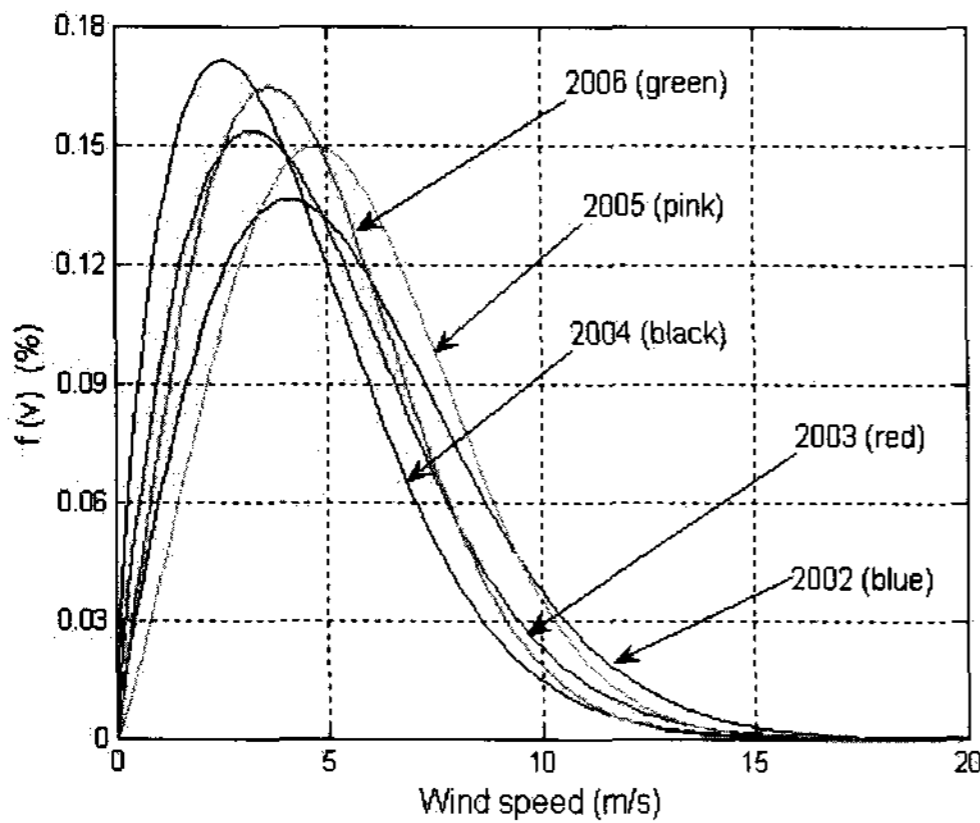


그림 5. 연별 와이블 분포 (2002년 ~ 2006년)

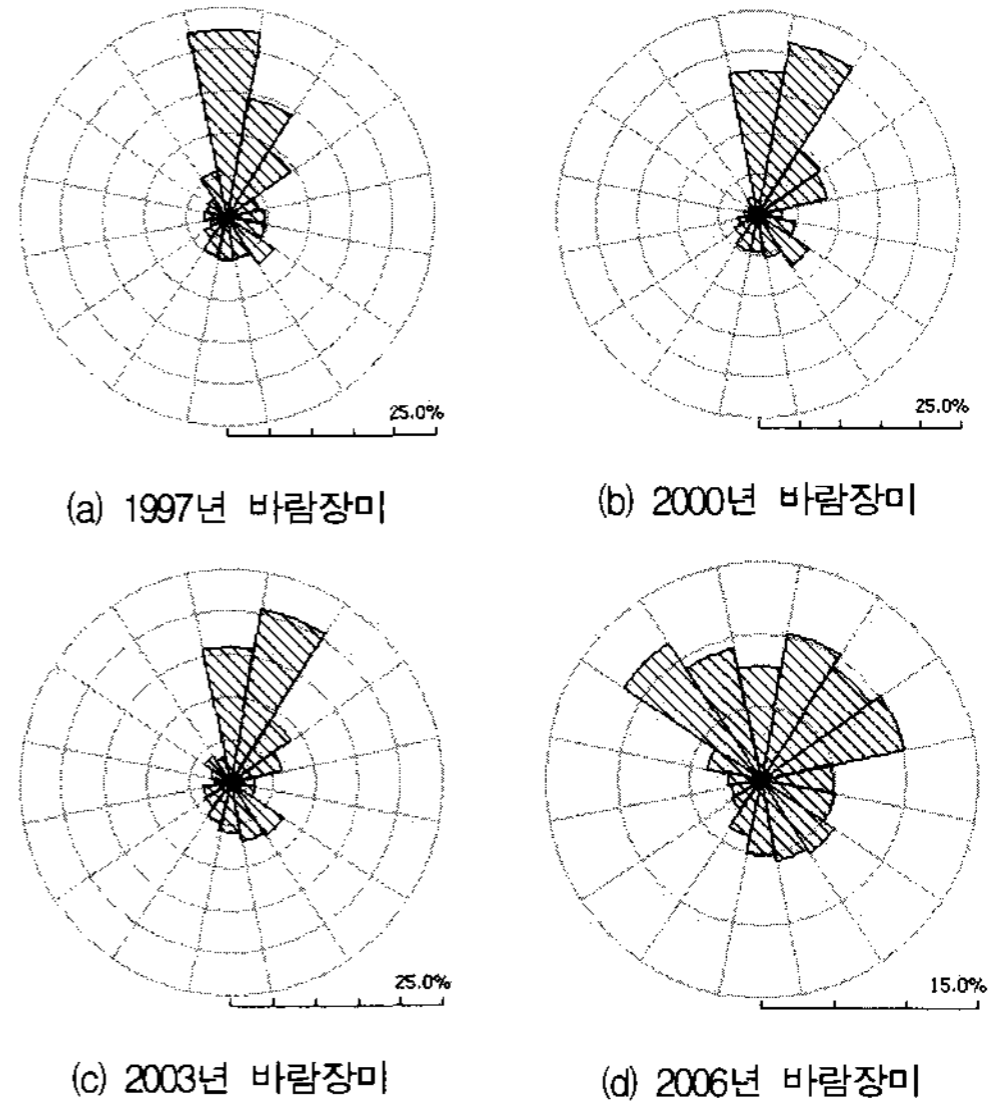


그림 6. 연별 바람장미

#### 4. 연간 발전량 (AEP) 예측

70m로 외삽하여 얻어진 바람데이터를 이용하여 연간 발전량 AEP가 예측되었다. 이 연구에서 발전량 예측을 위하여 사용된 2 MW Vestas V80 기종의 출력곡선을 그림 7에 나타낸다. 시동풍속과 종단풍속은 각각 3 m/s 와 25 m/s 이다. 또한 정격풍속은 약 16 m/s 이다.

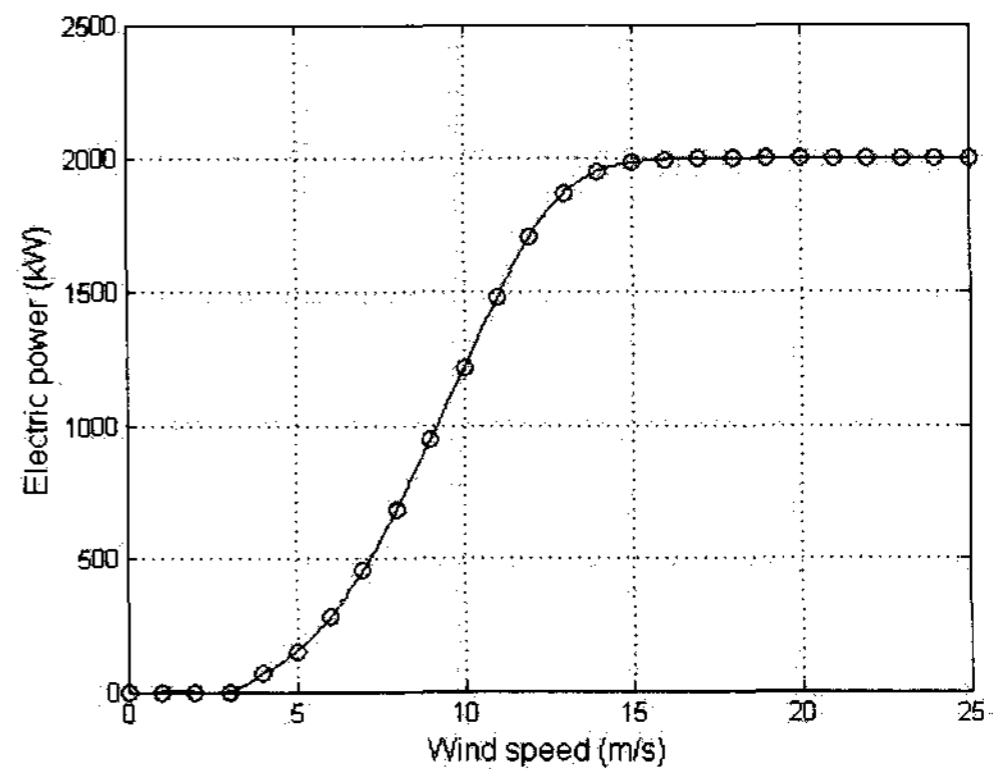


그림 7. 2 MW Vestas V80 출력곡선



표 3에 연별 AEP, 설비 이용률 CF, AEP의 변동범위 및 분산계수를 정리하였다. AEP는 다음 식<sup>6)</sup>으로 구하였다.

$$AEP = \bar{P} \times 8760 \quad (4)$$

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P_w(V) p(V) dV \quad (5)$$

여기서,  $\bar{P}$ 는 평균 풍력발전기 출력(avg. wind machine power)이고,  $P_w(V)$ 는 풍속 V에서의 출력,  $p(V)$ 는 V에서의 와이블 분포 값이다.

표 3. 연별 AEP, CF, AEP의 변동범위 및 분산계수

년	$\bar{P}$ (kWh/h)	AEP(70m) (GWh)	CF(%)	AEP의 변동범 위(%)	AEP의 분산계 수(%)
1997	325.00	2.847	16.3	-37.1 ~ +25.7	22.7
1998	300.41	2.632	15.0		
1999	214.02	1.875	10.7		
2000	365.65	3.203	18.3		
2001	336.15	2.945	16.8		
2002	359.24	3.147	18.0		
2003	252.28	2.210	12.6		
2004	182.88	1.602	9.1		
2005	344.81	3.021	17.2		
2006	229.19	2.008	11.5		
평균	290.96	2.55	14.55		

10년 동안 평균 AEP는 2.55 GWh로 예측되었지만, 이에 대한 분산계수는 22.7%이다. 이것은 표 2의 연평균풍속에 대한 분산계수의 약 2배이다. 이러한 결과는 풍력에너지는 풍속의 3제곱에 비례한다는 사실에 근거를 둔다. 즉, 연평균풍속의 변동 값보다 풍력발전기에서 생산되는 출력의 변동 값이 더 크다. 표에서 그 변동범위는 -37.1%에서 +25.7%이다. 이 수치 역시 연평균풍속의 변동범위의 약 2배임을 알 수 있다. 2000년과 2004년의 AEP를 비교해 보면, 약 1.6 GWh의 차이를 보이면서 해에 따라 연간 발전량

이 2배까지도 차이를 보일 수 있음을 단적으로 보여준다.

설비 이용률 CF는 다음 식으로 구하였다<sup>7)</sup>.

$$CF = \frac{\text{실제발전량(kWh)}}{\text{정격출력(kW)} \times \text{시간(h)}} \quad (6)$$

CF 값은 10년 평균 14.55%로 예상된다. CF 값이 20% 이상이면 풍황이 좋은 사이트라고 할 수 있으므로<sup>7)</sup>, 이 값으로부터 서광지역은 풍력자원이 풍부하지 않다고 생각된다. 그러나 바람데이터 측정과정 및 발전량 예측과정에서 발생할 수 있는 여러 가지 오차를 생각하면 반드시 그렇다고는 할 수 없다. 다른 특성 값들과 마찬가지로 CF 값도 해에 따라 큰 폭으로 변동하고 있음을 볼 수 있다.

### 5. 통계적 추론

지금까지 구한 10년 동안의 바람 특성 값의 통계적 특성을 파악하기 위하여, 중심극한정리<sup>8)</sup>가 적용되었다. 각 1년 동안의 풍속분포는 와이블 분포를 이루지만, 연평균풍속들의 분포는 중심극한정리에 의하여 정규분포가 된다고 할 수 있다. 선행연구로는 Nakao 등<sup>4)</sup>이 17군데의 기상관측소에서 수집한 장기간 바람데이터를 통계 분석한 결과, 연별 평균 풍속의 편차의 분포가 정규분포가 됨을 밝혔다. 이 연구에서 10년 동안의 바람데이터는 통계학적으로 표본의 크기가 비교적 작은 10이므로 이들의 분포를 정규분포 또는 t분포로 생각할 수 있다. 정규분포일 경우는 95%의 신뢰도를 갖기 위하여 다음 식으로 신뢰구간을 추정할 수 있다.

$$\bar{y} - 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

여기서,  $\bar{y}$ 는 표본평균의 평균, s는 표본평균의 표준편차, n은 표본의 크기,  $\mu$ 는 모평균을 나타낸다.

또한 t분포일 경우는 95%의 신뢰도를 갖기 위하여 다음 식을 사용한다.

$$\bar{y} - 2.262 \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + 2.262 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

신뢰도를 95%로 하여 각 바람 특성 값들의 상한 값과 하한 값을 추정한 결과를 표 4에 나타낸다. 보다 보수적인 신뢰 구간을 추정하는 t분포일 경우에도 연평균풍속의 상·하한 값의 차는 0.8 m/s 이하이다. 그러나 풍력 밀도의 상·하한 값의 차는 약 47~55W/m<sup>2</sup> 이고, AEP의 경우는 그 차이가 718~828 MWh로 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 풍력자원조사 시 장기간 분석이 필요한 근거로 활용될 수 있을 것이다.

표 4. 각 바람 특성 값들의 95% 신뢰 구간

구분	분포	상한 값	하한 값	상·하한 값의 차
연평균풍속 (m/s)	정규분포	5.304	4.622	0.682
	t분포	5.357	4.569	0.788
평균풍력밀도 (W/m <sup>2</sup> )	정규분포	177.186	129.984	47.202
	t분포	180.822	126.348	54.474
AEP (GWh)	정규분포	2.908	2.190	0.718
	t분포	2.963	2.135	0.828

## 6. 결 론

장기간(10년간)에 걸친 풍력에너지의 변동 특성을 파악하기 위하여, 제주도의 중산간에 위치한 서광지역에서 수집한 10년 동안의 바람데이터를 분석하였다. 기상청의 AWS로부터 얻은 바람데이터는 70m 높이로 보정된 후, 풍력에너지에 관한 특성 값들이 계산되었고, 해에 따른 연간 발전량도 예측되었다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 지상으로부터 15m 높이에서의 10년간 연평균풍속에 대한 각 연평균풍속의 변동 범위는 -22.6% 에서 +13.7%였다. 이 결과는 일본에서의 연구결과 보다 더 넓은

변동 범위이다.

- (2) 높이 70m로 보정한 연평균풍속의 변동 범위는 -19.8% 에서 +11.2%였고, 분산계수는 11.1%였다. 또한 연간 발전량의 변동 범위는 -37.1% 에서 +25.7%였고, 분산계수는 22.7%였다. 연간 발전량의 이러한 특성 값들은 연평균풍속의 약 2배였다.
- (3) 장기간 바람데이터를 통계적으로 분석한 결과, 각 특성 값들의 95% 신뢰구간을 산출할 수 있었고, 연간 발전량은 718~828 MWh의 범위로 변동함을 예측할 수 있었다.
- (4) 풍력자원조사를 1년간 실시하여 해당 지역의 풍력에너지 잠재량을 예측하는 것은 신뢰도에 문제가 있을 수 있다. 따라서 반드시 근처 기상관서에서 얻어진 장기간 바람데이터를 기초로 보정하여 판단해야 할 것이다.

## 후 기

이 연구를 위해 도움을 준 제주특별자치도 청정에너지과 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. BTM Consult ApS, <http://www.btm.dk/>, 2008.
2. IEA, IEA Wind Energy Annual Report 2006, IEA Wind, 2007.
3. 제주지방기상청, 2007 제주도 AWS 상세기후특성집, 제주지방기상청, 2007.
4. 中尾 徹, 杉谷 照雄, 加藤 秀樹, 小林 洋平, 風力發電計畫のための風況變動特性の検討, 風力エネルギー, Vol.28, No.4, 2004.
5. Mikhail A.S. and Justus, C.G., Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis, Wind Engineering, Vol. 5, No. 2, pp.91-107, 1981.

6. J.F. Manwell, J.G. McGowan A.L. Rogers, Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Ltd, 2004.
7. 고경남, 허종철, 풍력공학입문, 문운당, 2006.
8. 김우철 외, 통계학개론, 영지문화사, 1996.