

濟州道에서의 風力에너지 利用을 위한
工學的 豫測에 關한 研究(Ⅲ)

—대정지역에 대하여—

高長權 , 許鐘哲*

A Study about the Estimation of Potential for Using
the Wind Energy in Cheju Island(Ⅲ)
—At Daejung Site—

Koh Jang-kwon, Huh Jong-chul

Summary

The aim of this paper is to investigate wind speed characteristics based on the wind data of Daejung site as the place of the highest potential energy of wind power in Cheju Island, and to provide optimum design for wind power conversion system being suitable to the wind speed characteristics. The results are as follows:

1. Suitable Weibull coefficients, K and C, of wind speed distribution at Daejung site are evaluated. And then, the wind speed characteristics are examined and determined.
2. The optimal rated wind speed of which wind power conversion system is suitable to wind speed characteristics is evaluated.
3. Monthly no-generation percentage by the results from calculating optimal starting wind speed and calm is graphed.
4. In the case of varying the system heights from 10m to 70m, optimal rated wind speeds of the system are determined by extrapolating Weibull coefficient, K and C, variations of maximum efficiency and load factor of the system are graphed, depending on the heights.

理工大學 教授, * 理工大學 專任講師

序 論

풍력에너지는 풍차에 의하여 수집되어 기계적인 회전운동에너지로 변환된다. 이 운동에너지는 관계 및 양수등에 직접 이용되거나 전기 및 열에너지로 변환되어 저장된 후 각종 용도에 이용되고 있다. 그러나 본 연구는 제주도 지역여건에 비추어 풍력에너지를 발전시스템으로 이용할 경우로 국한한다.

제주도에서의 풍력에너지 이용을 위한 연구 중 에서 동력자원연구소의 연구보고서(1984)는 제주도내 일부 지역이 국내 타지역보다 풍력밀도가 높게 분포하고 있음을 보였고, 필자(1986)는 제주도 전 지역을 포괄할 수 있는 4개 지역을 선정하여 지역별 풍력에너지포텐살을 산정한 결과 그 중 대정 지역이 타 3개 지역보다 월등하게 높음을 구명하였다. 그러나 1년간의 풍속자료를 해석함으로써 해당지역의 풍속특성 및 풍력에너지포텐살을 정확히 예측 되었다고 보기는 어렵다. 따라서 위 지역에 대한 정확한 예측을 위하여 5년간(1981. 1. 1~1985. 12. 31)의 풍속자료를 제주측후소 대정분소로부터 발취하고 이 자료로부터 통계분석을 통하여 풍속특성을 구명하고, 풍속특성의 해석 결과로부터 풍속특성에 적합한 풍력발전시스템이 설계제원을 제시하고자 한다.

풍속은 시간에 따라 변하므로 이러한 가변성을 특성화시키는 통계적 Model이 필요하다. 선행의 연구에서 Weibull분포가 풍속분포에 가장 적합한 것으로 알려져 있으며(Stevens, 1979, Bowden, 1983), 또한 Tuller(1984)와 Exell(1985)는 풍속분포를 Weibull분포에 더욱 fitting시키기 위한 방법으로 풍속분포중 정온(Calm)을 제외시켜 풍속특성을 해석 하였다.

풍속특성의 분석결과를 풍력발전시스템이 에너지 포텐살에 적용하기 위해서는 시스템의 정격출력과 풍속과의 가상적인 관계식이 필요하다. 이 관계식이 선택에 따라 가상시스템의 성능특성이 달라지므로 대단히 중요한 의미를 가지나 연구자에 따라 거이 다른 관계식을 채택하고 있다. 그러나 최근에 C. N.

Jones(1986)은 해석하기 쉬운 2차함수를 제시하는 바 본 연구에서는 Justus(1976)와 Chou(1980)가 사용한 2차함수식으로 가정하였다. 또한 단일지역이라 할지라도 시스템 설치높이에 따라 풍속특성이 달라지므로, 풍속측정점으로부터 높이에 대한 Extrapolation식은 Justus(1976)가 고안한 관계식이 이용되고 있다.

風速資料 및 解析方法

1. 風速資料

풍력발전시스템은 설치지역의 풍속특성에 적합한 시스템이 요구된다. 따라서 설치에 앞서 설치 예정지역이 풍속특성을 반듯이 해석하여야 한다. 이를 위하여 장기간 풍속자료가 필요하다. 일반적으로 설치예정지역 근처의 측후소 자료를 이용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대정분소의 풍정기록지부터 풍속자료를 발취하였다. 발취한 기간은 1981년 1월 1일부터 1985년 12월 31일까지 5년간이다. 풍속측정기기는 3배풍속계이며 설치높이는 지면으로부터 6m이다.

그림1은 풍속기록지의 예이며 10분마다 y축의 최대높이로 10분평균풍속을 기록하고 있음을 보여 준다. 그러나 본 연구(1)(1986)의 결과에 의해 시간간 10분 평균풍속만을 이용하였다.

2. 解析方法

Weibull분포가 해당지역의 풍속분포를 나타낼 수 있는 가장 적합한 분포임이 선행의 연구에서 입증되었다. Weibull확률 밀도함수 $f(V)$ 는

$$f(V) = K/C(V/C)^{K-1} \text{EXP}(-(V/C)^K)$$

로 정의된다. 위 분포함수의 계수 C(Scale parameter), K(Shape parameter)를 구하면 임의 속도에 대한 $f(V)$ 가 산출되므로 이 K, C값으로 해당지역이 풍속특성을 규정할 수 있다. 또한 위 함수의 누적인 누적분포함수 $F(V)$ 는

$$F(V) = 1 - \text{EXP}(-\left(\frac{V}{C}\right)^K)$$

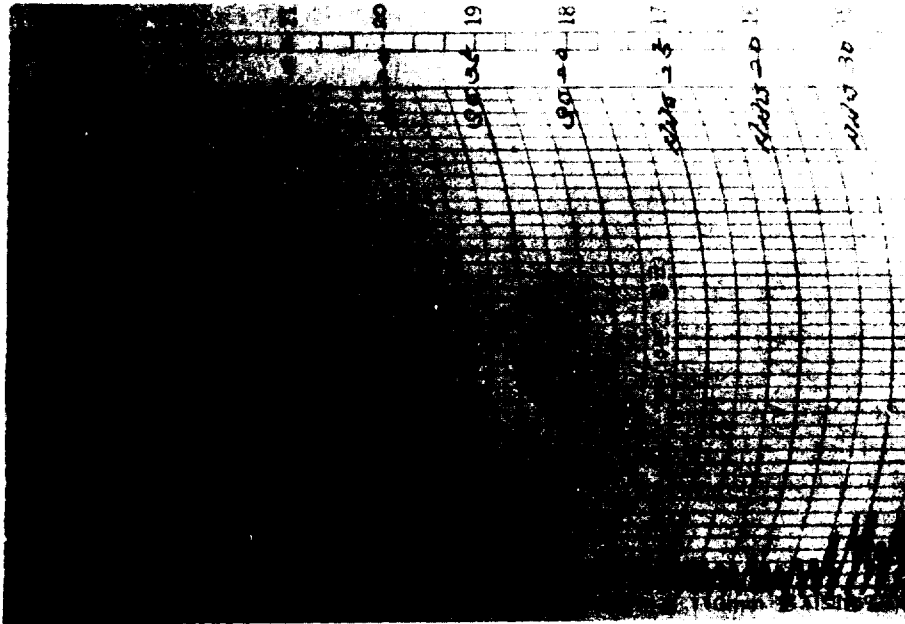


Fig. 1. The self-recording paper of three-cup anemometer at Daejung.

이다. 따라서 임의지역의 풍속자료를 월별, 계급 별로 누적시켜 최소자승법(Least square method)을 적용하면 월별 K, C가 산출된다. 계산과정에서 풍속계급은 0.5m로 하여 계산한 결과 Weibull분포와 풍속분포는 fitting이 되었으나 풍속분포가 낮은 계급에 편중될 경우 fitting에 많은 오차가 발생하였다. 그러나 정온상태의 자료를 계산과정에서 제외시켜 계산할 경우 풍속분포와 Weibull분포가 거의 일치하였다. 이때 계수 K, C를 월별 풍속특성으로 하였다. 한편 누적분포함수에서 속도V가 풍력발전시스템이 시동풍속이고 중단풍속이 존재하지 않을때 F(V)는 시스템 가동이 정지되어 발전이 불가능한 확률 즉 No-generation probability를 나타낸다(S. S. Thabit, 1984). 지역 풍속특성에 적합한 최적풍력발전시스템의 설계제원을 구명하기 위해서는 공기가 정상유동 조건을 만족한다고 가정하고 출력과 풍속이 관계를 나타낼 수 있는 특성곡선을 일반적으로 이용하고 있다. 이 출력-풍속곡선은 발전시스템의 특성을 나타내므로 풍속이 시동풍속(Cut-in speed)에 이를때까지와 중단풍속(Cut-out or furling speed) 이상에

서는 출력이 0이며, 시동풍속에서 정격풍속까지 출력은 풍속이 증가에 증가하는 직선 혹은 곡선이나 이 곡선의 가정은 대단히 다양하다. 그러나 본 연구에서는 2차함수로 가정하였다. 한편 실제 풍력터빈은 Blade 피치각이 가변으로 설계되어 있다. 따라서 정격풍속 이상에서는 풍속이 증가와 동시에 피치각이 증가되어 즉 동력계수(Power coefficient)가 감소되어 중단풍속에 이르기까지 일정한 정격출력으로 유지된다. 위를 수식으로 표현하면 아래와 같다

$$P(V) = k \cdot \begin{cases} 0 & V \leq V_c \\ A + BV + BV^2 & V_c < V \leq V_r \\ R & V_r < V \leq V_f \\ 0 & V_f < V \end{cases}$$

여기서 V_c , V_r , V_f 는 각각 시동, 정격, 중단풍속이며, R은 정격출력이다. 또한 k는 $\frac{1}{2} \rho A C_p \eta_{tot}$ 이며 ρ , A, C_p , η_{tot} 는 공기밀도, Blade단면적, 동력계수, 시스템전체효율이다. 그리고 위 식의 초기조건은 시동풍속, 정격풍속, 중단풍속(Midium

speed)을 적용하여 구할 수 있고 이 산식에 Matix 역변환을 취하면 쉽게 상수 A, B, C가 결정된다. 그러므로 풍속이 전구간에 대한 평균출력은

$$\begin{aligned} \bar{P} &= k \cdot \int P(V) f(V) dV \\ &= k \cdot \left[\int (A + BV + CV^2) f(V) dV \right. \\ &\quad \left. + R \cdot \text{EXP}((-V_c/C)^K) \right] \end{aligned}$$

이다. 위 식의 괄호내 첫 항은 수치 적분중 Simpson의 적분식을 이용하였다. 그런데 위 식을 \bar{P}/R 로 정리하면 무차원인 부하계수(Load factor)가 되며, 부하계수는 풍력에너지로부터 발생하는 회전 에너지를 직접 사용한 경우 대한히 중요한 인자가 된다. 한편 바람으로부터 얻을 수 있는 평균출력 \bar{P}_a 는

$$\bar{P}_a = \frac{1}{2} A P C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right)$$

이고 다시 시스템에 적용하면 아래와 같다.

$$\bar{P} = k \cdot A C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{K}\right)$$

\bar{P}/\bar{P}_a 를 효율(Statistical efficiency)로 정의 된다. \bar{P}/R , \bar{P}/\bar{P}_a 의 계산은 V_c/V_r 이 0.260에서 0.587이 범위내에 존재하므로 0.3, 0.4, 0.5일 경우에만 산출하였다.

높이변화에 따른 풍속 변화를 구명하기 위한 여러 방법중 풍속측정장소 주위에 대한 정보가 없을 때 Power law model(A. S. Mikhail, 1981)을 이용하고 있다. 그러나 풍속특성은 Justus와 Mikhail에 의해 Power law model과 상사이고 경험적 방법으로 유도된 아래식에 의해 높이에 따른 Weibull 계수, K, C값을 Extrapolation시켰다.

$$K(z) = \frac{K_a(1 - 0.088 \ln(Za/10))}{[1 - 0.088 \ln(Za/10)]}$$

$$C(z) = C_a [Z/Z_a]^\alpha$$

여기서 α

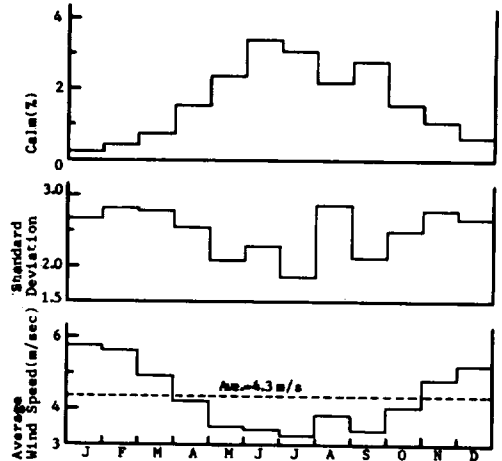
$$\alpha = [0.37 - 0.088 \ln C_a] / [1 - 0.088 \ln(Za/10)]$$

이다. 그리고 Z는 Extrapolation 하고자 하는 높이를 나타내며 첨자 a는 풍속 기기의 설치높이를 표시한다. 본 연구에서는 70m까지(J.C. Dixon, 1984) 계산하였다.

結果 및 考察

대정지역에 대한 풍속자료를 통계분석하기 앞서 위 자료가 Weibull계수 K, C에 영향을 미치는 인자들을 중심으로 검토할 필요가 있다.

그림2는 5년동안 월별평균풍속, 평균풍속에 대한 표준편차, 정온%을 나타내고 있다. 그림에서 5년평균풍속은 4.3m이고, 평균풍속은 겨울이 여름



에 비해 현저하고 높게 나타나고 있으며 봄가을은 그 천이임을 알 수 있다. 그러나 8월인 경우는 여름 주위 다른 달보다 뚜렷하게 평균풍속이 높으며, 또한 표준편차는 1년중 가장 높게 나타나고 있다. 이는 연례적으로 여름 1달동안은 심한 풍속변화를 예측할 수 있으며 태풍이 영향으로 사료된다. 따라서 1년중 여름 1달은 태풍의 영향으로 풍력발전시스템 가동이 중지된다고 판단하여 풍속자료에서 제외시켰다. 위 고찰 결과로 평균풍속이 현저히 높은 12, 1, 2월(겨울), 낮은 5, 6, 7, 9월

(여름), 천이구역인 3, 4, 10, 11월 3집단으로 분류하였다. 사실상 Weibull계수 K, C는 풍속분포에 의해 결정되는 상수이다. 그런데 평균풍속이 다를 경우는 풍속분포가 달라지므로 계수 K, C값 역시 달라진다. 또한 출력은 계수C의 3제곱에 비례하므로 1년평균 풍속으로 출력을 예측할 경우와 3집단으로 세분화하여 산출된 출력과는 상이함으로 지역풍속 특성이 충분히 고려되어 예측이 보다 정확

도록 집단화 하였다. 그리고 그림에서 평균풍속이 낮은 경우는 정온도가 현저히 높게 나타나고 있다. 이는 Weibull분포와 풍속분포와의 오차를 야기시키기 때문에 실제 Weibull계수 산출에는 정온도를 풍속자료에서 제외시켜 Weibull함수에 fitting시켰다.

표1은 5년간 월별평균풍속분포를 Weibull분포에 fitting시켜 산출된 값을 나타낸다. 이 값은 분 연

Table 1. Monthly Shape and Scale Parameters at 6m

Para.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
K	2.172	1.914	1.744	1.652	1.702	1.492	1.824	1.522	1.478	1.632	1.674	1.928
C	5.956	5.856	5.052	4.418	3.684	3.492	3.398	4.104	3.608	4.142	4.960	5.384

구에 있어서 모든 계산의 기본자료로 활용하였다. 표2는 1년을 3집단화하여 평균한 Weibull계수

K, C값과 V_r/V_c 을 0.3, 0.4, 0.5로 할 경우 최대 효율, 시스템의 최대효율이 될 때 시동 및 정격풍

Table 2. Load Factor, ideal wind power density and optimal rated wind speed at max. statistical efficiency at Daejung site about the height variations

height	seasons	K	C	V_r/V_c	V_r	η_{max}	Lf	IWPD(W/m^2)
6m	winter	2.005	5.732	0.3	12.3	0.875	0.143	152.9
				0.4	11.0	0.818	0.153	
				0.5	10.0	0.741	0.185	
	summer	1.637	3.598	0.3	8.1	0.834	0.101	45.5
				0.4	7.7	0.771	0.112	
				0.5	7.4	0.700	0.120	
	others	1.676	4.643	0.3	10.7	0.838	0.105	101.9
				0.4	10.2	0.776	0.129	
				0.5	9.8	0.695	0.135	
10m	winter	2.095	6.371	0.3	12.5	0.884	0.148	201.0
				0.4	11.8	0.829	0.166	
				0.5	10.8	0.751	0.196	
	summer	1.711	3.983	0.3	9.4	0.843	0.103	62.4
				0.4	8.8	0.790	0.117	
				0.5	8.2	0.710	0.120	
	others	1.751	5.208	0.3	11.8	0.848	0.114	153.0
				0.4	11.0	0.787	0.130	
				0.5	10.4	0.706	0.138	
				0.3	13.5	0.896	0.167	

height	seasons	K	C	Vr/Vc	Vr	η_{\max}	Lf	IWPD(W/m ²)
20m	winter	2.231	7.354	0.4	12.7	0.843	0.188	280.3
				0.5	11.8	0.707	0.214	
	summer	1.822	4.731	0.3	10.2	0.856	0.129	91.5
				0.4	9.5	0.796	0.139	
				0.4	9.0	0.715	0.147	
				0.3	12.8	0.861	0.127	
others	1.865	6.086	0.4	12.0	0.802	0.145	189.9	
			0.5	11.0	0.723	0.169		
30m	winter	2.319	7.998	0.3	14.0	0.902	0.180	334.9
				0.4	13.3	0.850	0.200	
				0.5	12.5	0.776	0.219	
	summer	1.894	5.233	0.3	10.8	0.864	0.125	111.9
				0.4	10.0	0.806	0.147	
				0.5	9.3	0.730	0.165	
others	1.938	6.667	0.3	13.0	0.869	0.149	227.5	
			0.4	12.5	0.812	0.162		
50m	winter	2.441	8.891	0.5	11.5	0.734	0.179	411.8
				0.3	14.8	0.912	0.189	
				0.4	14.0	0.862	0.211	
	summer	1.993	5.941	0.3	11.3	0.874	0.140	141.9
				0.4	10.5	0.817	0.164	
				0.5	9.8	0.740	0.190	
others	2.040	7.478	0.3	14.0	0.878	0.147	281.1	
			0.4	13.3	0.823	0.161		
70m	winter	2.528	9.532	0.5	12.3	0.745	0.840	468.8
				0.3	15.2	0.918	0.200	
				0.4	14.5	0.869	0.218	
	summer	2.064	6.458	0.3	12.0	0.873	0.141	164.1
				0.4	11.3	0.870	0.157	
				0.5	10.5	0.756	0.175	
others	2.113	8.065	0.3	14.2	0.885	0.162	320.3	
			0.4	13.5	0.831	0.177		
				0.5	12.5	0.754	0.202	

속, 부하계수를 산출하여 도표화한 것이다. 또한 풍력발전시스템이 설치높이를 10, 20, 30, 50, 70m로 가정하고 계수 K, C를 보하여 V_r, η_{max}, L_f 를 산출하여 표에 수록하였다. 표에서 IWPD는 이 상풍력밀도이다.

그림3은 높이 변화에 따른 시스템효율과 부하계수를 보여주고 있다. 그림에서 효율과 부하계수는

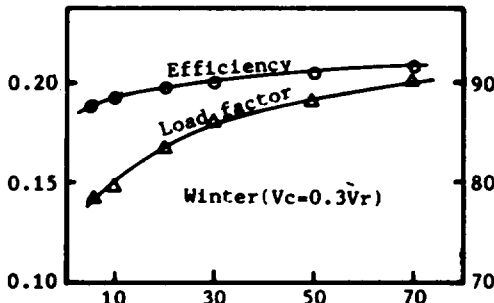


Fig.3 Load factor and efficiency about the height variation

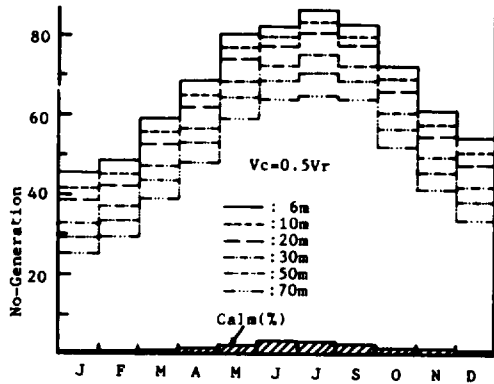
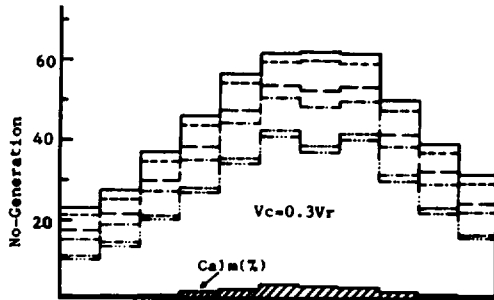


Table 3. Optimum rated speed per year

height	V_r/V_c	$V_r(V_c)$
6 m	0.3	10.5(3.2)
	0.4	10.0(4.0)
	0.5	9.3(4.7)
10 m	0.3	11.5(3.5)
	0.4	11.0(4.4)
	0.5	10.0(5.0)
20 m	0.3	12.5(3.8)
	0.4	11.8(4.7)
	0.5	11.1(5.6)
30 m	0.3	13.2(4.0)
	0.4	12.3(4.9)
	0.5	11.4(5.7)
50 m	0.3	13.4(4.0)
	0.4	12.7(5.1)
	0.5	12.2(6.1)
70 m	0.3	14.2(4.3)
	0.4	13.4(5.4)
	0.5	12.4(6.2)

높이 30m근방까지는 증가폭이 크나 그 이상에서는 거의 변화가 없다. 다른 집단이 경우도 비슷한 경향을 보였다.

그러나 표2는 집단별 최적풍력발전시스템 계원 이므로 년중 최대출력을 발생시킬 수 있는 최적정 격풍속을 제차 결정해야 한다. 이를 산출하기 위하여 각각의 집단별 최대효율을 갖는 시동 및 정격 풍속에서 출력을 계산한 후 집단별 달수를 곱한값 즉 1년중 발전시스템으로부터 얻을 수 있는 최대 출력과 K, C값이 다른 집단별 산식에서 정격풍속 을 변화 시키면서 출력을 계산한 후 달수를 곱한 출력과의 비가 최대가 되는 정격풍속을 산출하였다. 이 값은 1년동안 풍력발전시스템으로부터 생 산되는 출력을 최대로 하여 준다.

표3은 대정지역의 풍속특성을 고려하고 최적정 격풍속을 높이변화에 따로 도표화한 최종 결과이다.

그림4는 풍력발전시스템이 가동의 중지지된 즉

No-generation%을 월별로 보여주고 있다. No-generation은 최적시동풍속의 값을 누적분포에 대입하여 얻은 값과 풍속자료에서 제외시킨 정온%의 합이다. 또한 8월은 태풍이 영향으로 시스템 가동이 불가능하다고 판단하여 즉 No-generation값이 100%로 생각하여 그림에서 제외시켰다. 그리고 V_c/V_{ro} 이 0.4인 경우는 0.3과 0.5의 중간값을 나타냈기 때문에 생략하였다.

摘 要

본 연구는 제주도내 가장 풍력에너지포텐셜이 높은 대정지역의 풍속자료(1981. 1. 1-1985. 12. 31)를 근거로 하여 풍속특성과 풍속특성에 적합한 풍

력발전시스템 설계제원에 대하여 고찰한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 대정지역의 풍속분포에 적합한 Weibull 계수 K, C를 산출하여 풍속특성을 구명하였다.
2. 풍속특성에 적합한 풍력발전시스템의 최적정격풍속을 산출하여 시스템 설계제원을 제시하였다.
3. 최적시동풍속 및 정온의 계산결과로 월별 No-generation%을 도시하였다.
4. 시스템 설치 높이가 10, 20, 30, 50, 70m로 변환할 경우 Weibull계수 K, C를 Extrapolation하여 시스템 최적정격풍속을 결정하였고, 높이에 따라 시스템 최대효율 및 부하계수의 변화를 도시하였다.

參 考 文 獻

- Bowden G. J. and P. R. Barker et al. 1983, The Weibull distribution Function and Wind Power Statistics, *Wind engineering Vol.7*, No.2, pp. 95-98.
- Chou Karen C. 1980, Simulation of Hourly Wind Speed and Array Wind Power, *Haraza Engineering*, Chicago, IL, pp.199-212.
- Dixon J. C. and r. H. Swift, 1984, The Dependence of Wind Speed and Weibull Charaateristics on Height for Offshore Winds, *Wind Engineering Vol. 8*, No. 2, pp. 87-98.
- Excell R. H. B, 1985, The Wind Energy Potential of Thailand, *Solar Energy Vol.35*, No.1, pp. 313.
- Haslett J., et al, 1981, A Note on the Use of the Models in the Estimation of Wind Power Availability, *Wind Engineering Vol.5*, No.1, pp. 6-11.
- Jhpson Gray L., 1978, Economic Design of Wind Electric System, *IEEE. Tr. Power Appartus and System Vol. PAS-97*, pp. 554-562.
- Jones C. N., et al. 1986, Notes on the Effect of Site Wind Speed Frequency Distribution and Machine Performance Charateristics on the Annual energy Output of a WECS, *Wind Engineering Vol. 10*, No.1, pp. 31-46.
- Justus C. G., et al, 1976, National Assesment of Potential Output from Wind Powered Generators, *J. Applied Meteorology Vol.15*, N.7, pp. 673-678.
- Justus C. G., 1978, Winds and Wind System Performance, The Frankline Institute Press, pp. 59-63.
- 고장권외, 1986, 제주도에서의 풍력에너지 이용을 위한 공학적 예측에 관한 연구, 연구보고서, 한국과재단.
- Mihail A. S. and C. G. Justus. 1981, Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis, *Wind Engineering Vol.5*, No.2, pp. 91-107.
- 신동열외, 1984, 풍력발전 기술개발(II), 연구보고서, 한국동력자원연구소
- Stevens M. J. M. and P. T. Smulders. 1979, The Estimation of the Parameters of the Weibull wind Speed Distribution for Wind

Energy Utilization Purpose. *Wind Engineering*
Vol.3, No.2, pp.132-145.

Thabit S. S. and J. Stark. 1984, Wind Avariabil-
ity Effects on the Reliability and Economics

of Electricity generated for Industrial Ap-
plications. *Wind Engineering* Vol.8, No.1, pp.
36-49.