

濟州道에서의 風力에너지 利用을 爲한 工學的 豫測에 關한 研究(Ⅱ)

—風力에너지 포텐셜에 關하여—

高長權, 權麒麟*, 許鐘哲**

A Study about the Estimation of Potential for Using the Wind Energy in Cheju Island(Ⅱ) —On the Wind Energy Potential—

Koh Jang-kwon, Kwon Ki-rin, Huh Jong-chul

Summary

This paper was designed to compute the actual expected output power of the wind wind energy conversion system in Cheju Island.

The wind data were measured by the four local weather stations at Cheju, Seogui, Sungsan and Dejeung from Oct. 1984 to Sep. 1985.

The ideal wind power density was calculated from which the characteristics of the wind speed at 10m from surface were analyzed. Thus, it made it possible to choose the best site in setting up the wind energy conversion system.

We estimated the optimum rated wind speed of the system to fit with the characteristics of the wind speed of each site.

序 論

최근 세계 각국의 에너지 시정은 대체에너지로

理工大學 敎授, * 理工大學 助敎授, ** 理工大學 專任講師

서 자연에너지의 개발 촉진을 유도하고 있다. 자연에너지 중에서도 풍력에너지는 무공해이며 연료비가 없고 수명이 길다는 장점에 의해 주목을 받고 있다.

풍력발전시스템은 설치예정지역의 지역특성, 기상조건에 상당한 영향을 받기 때문에 그 지역에서 풍속특성을 고려하여 발전량예측 또는 시스템의 최적설계등이 정확히 추정되어야 한다.

선행의 연구에서 Lalas(1983)는 지역별 이상풍력밀도 및 실제풍력밀도를 산정함으로써 풍력발전시스템의 적지 선정을 가능케 하였으며, Haslett(1981)와 Karen C. Chou(1980)는 해당지역의 풍속특성에 적합한 정격풍속을 결정하였고, Grag L. Jhonson(1978)은 풍력발전시스템의 최적설계방법을 제시 하였다.

국내에서는 이철영의(1984, 1985)가 국내측후소의 풍속자료를 사용하여 풍속자료 분석 및 국내전 지역에 대하여 이상풍력밀도를 산정하였으며 또한 지역풍속특성에 적합한 최적정풍속을 산출하였다.

본 연구는 제주도내 풍력발전시스템 설치시 예상되는 출력을 예측하기 위한 연구로서 이상풍력밀도를 산정하여 풍력발전시스템의 적지 선정을 가능케하는 동시에 지역풍속특성에 적합한 최적정격풍속을 산출하며, 아울러 실제풍력발전시스템의 출력을 예측하기 위한 것이다.

解 析 方 法

1. 理想風力密度 算定

바람으로부터 얻을 수 있는 동력(W)은

$$P_i = \frac{1}{2} \rho A V^3 \dots\dots\dots(1)$$

이다. 여기서 V는 순간풍속, ρ는 공기밀도, A는 바람이 통과하는 단면이다. 한편 Weibull 확률밀도함수는

$$f(V) = (K/C)(V/C)^{k-1} \text{EXP}(-(V/C)^k) \dots\dots\dots(2)$$

이다. 위 함수를 사용하여 바람으로부터 얻을 수 있는 평균동력 \bar{P}_i 를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{P}_i = \frac{1}{2} \rho A C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \dots\dots\dots(3)$$

이상풍력밀도(W/m^2)은

$$\bar{P}_i/A = \frac{1}{2} \rho C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle \dots\dots\dots(4)$$

이다. 식(4)는 해당지역에 대한 Weibull 계수 K,C를 대입하면 그 지역의 이상 풍력밀도를 산출할 수 있으며 여기서 Γ는 Gamma 함수이다. 그림1은 자료

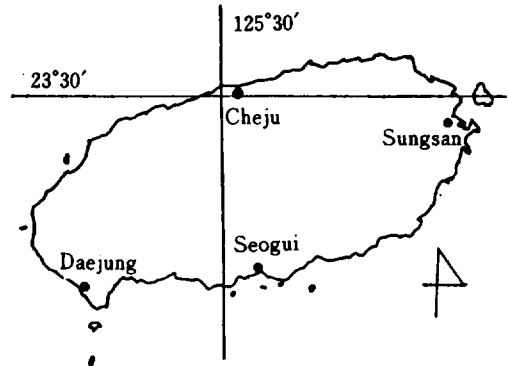


Fig. 1. Locations of local weather station utilized in this study

를 측정된 4지역을 표시한 것이며 제주도 4개지역에 대한 Weibull계수 K,C는 본 연구(I)에서 산출한 바 있다.

2. 最適定格風速 結定

풍력발전시스템에서 출력을 예측하기 위해서는 출력과 풍속과의 관계식이 필요하다. 이 관계식은 출력특성곡선으로 정의되고 있으며 출력특성곡선의 선택에 따라 예상출력이 달라진다.

그림2는 출력과 풍속과의 관계를 나타내는 출력특성곡선이다. 실제풍력발전시스템은 시스템의 기계적마찰 및 손실이 수반되기 때문에 풍속이 증가

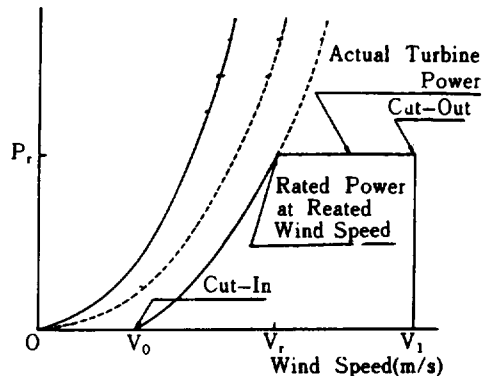


Fig. 2. Typical shape of the power output curve of a WECS as compared to the available power in the wind.

하여 회전자에서 발생하는 토크가 이들은 극복할 때 회전자가 회전하게 되며 출력이 발생하기 시작한다. 이때의 풍속을 시동풍속 \$V_0\$, 풍속이 증가하여 시스템출력이 정격출력 \$P_r\$으로 될 경우의 풍속을 정격풍속 \$V_r\$, 또 정격풍속 이상에서는 출력이 일정하게 유지되나 시스템 안전을 고려하여 운전을 중단할 경우의 풍속이 중단풍속 \$V_1\$가 된다. 그러므로 실제 풍력발전시스템은 출력이 0인 \$V_0\$와 \$V_1\$가 존재하고 \$V_r\$ 이상에서는 출력이 일정하기 때문에 본 연구에서 사용한 출력곡선식은 다음과 같이 가정하였다. (Karen C. Chou, 1980, C. G. Justus, 1976).

$$P(V) \begin{cases} 0 & v \leq v_0 \\ A + BV + CV^2 & v_0 < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_1 \\ 0 & v_1 < v \end{cases} \dots (5)$$

상수 A, B, C를 구하기 위한 초기조건은

$$\begin{aligned} A + BV_0 + CV_0^2 &= 0 \\ A + BV_r + CV_r^2 &= P_r \\ A + BV_c + CV_c^2 &= P_r (v_c/v_r)^3 \end{aligned}$$

이다. 단 \$V_c = (V_0 + V_1)/2\$이고 식(5)의 상수를 구하면

$$\begin{aligned} B &= P_r \cdot \frac{(v_c/v_r)^3 (v_r^2 - v_0^2) - (v_c^2 - v_0^2)}{(v_r - v_0)(v_r - v_c)(v_c - v_0)} \\ C &= \frac{P_r - B(v_r - v_0)}{(v_r^2 - v_0^2)} \\ A &= -BV_0 - CV_0^2 \end{aligned}$$

이다. 따라서 풍력발전시스템의 평균출력 \$\bar{P}_a\$는

$$\begin{aligned} \bar{P}_a &= \int_0^\infty P(V) f(V) dV \\ &= \int_{V_0}^{V_r} (A + BV + CV^2) f(V) dV + \int_{V_r}^{V_1} P_r f(V) f(V) dV \\ &= \int_{V_0}^{V_r} (A + BV + CV^2) f(V) dV + P_r \text{Exp}(-V_r/C)^k \\ &\dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

이다. 식(6)에서 첫항은 수치적분으로 구할 수 있으며 둘째항은 풍력발전시스템의 정격출력이 결정되면 구할 수 있다. 그러나 식(6)의 해를 구하기 위해서는 시동풍속과 정격풍속을 임의로 가정해야 하는데 시동풍속과 정격풍속은 풍력발전 설치예정 지역의 풍속특성에 따라 변하고, 시동정격풍속의 변화에 따라 시스템출력 \$\bar{P}_a\$도 변화하므로 지역 풍속 특성에 적절한 시동정격풍속을 결정해야 한다. 이를 위하여 \$V_r/C = m\$, \$V_0/V_r = n\$이라 놓고 \$m, n\$을 변화시키면서 \$\bar{P}_a/P_r\$ (Load factor)와 \$\bar{P}_a/\langle V^3 \rangle\$ (Statistical efficiency)를 산출하면 시스템 효율 \$W_f\$가 최대가 되는 \$V_r\$을 결정할 수 있으며, 이때의 \$V_r\$과 \$V_0\$를 이용해서 단위면적당 최대평균출력 \$\bar{P}_a/A\$를 계산할 수 있다. 실제 최대평균출력의 계산에는 공기밀도, 회전자의 동력계수, 전달장치 및 발전기 효율을 각각 \$1.225 \text{ kg/m}^3\$, \$0.4\$, \$0.8\$로 하였다.

結果 및 考察

1. 理想風力密度

그림3은 제주, 성산, 대정, 서귀지역의 풍속

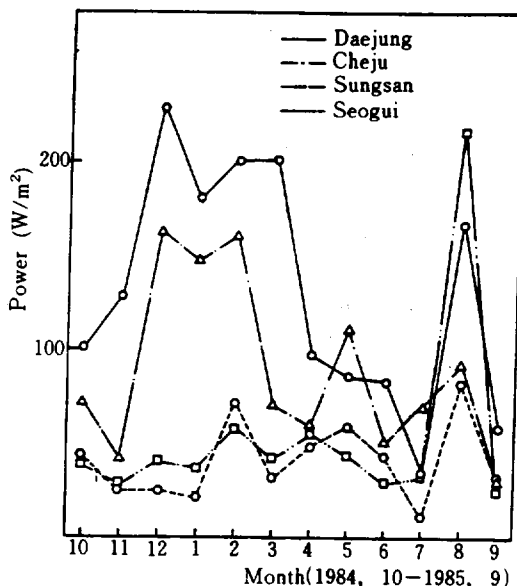


Fig. 3. Monthly mean values for the ideal power density at Cheju, Sungsan, Daejung and Seogui station.

분포를 Weibull함수에 fitting시켜 구한 K, C값을 사용하여 산출된 이상풍력밀도를 보여주고 있다.

그림으로부터 서귀, 성산의 경우 이상풍력밀도는 년중 거의 비슷한 $40W/m^2$ 이다. 단 8월은 태풍의 영향으로 풍력밀도가 급격히 상승하고 있으나 풍력시스템의 안전을 고려한다면 1년중 얻을 수 있는 에너지는 가장 적을 것으로 생각된다.

대정지역은 제주도내에서 풍력밀도가 가장 높게 나타나고 있다. 특히 12월에서 3월까지 4개월간은 이상풍력밀도가 $200W/m^2$ 에 달하고 있으며 7월부터 9월까지는 타지역과 마찬가지로 낮게 나타나고 있다. 10, 11, 5, 6월은 그 중간값인 $100W/m^2$ 정도이다.

제주지역은 대정지역의 월별 풍력밀도분포와 비슷한 경향을 보여주고 있으나 전반적으로 낮게 분포하고 있다.

요약하면 이상풍력밀도는 제주4개지역중 대정지역이 가장 높은 분포를 보이며, 태풍의 영향은 서귀, 제주지역보다 성산, 대정지역이 뚜렷하며, 또한 성산, 서귀지역은 계절에 관계없이 년중 풍력밀도가 일정한 반면에 제주, 대정지역은 여름과

겨울의 기폭이 뚜렷함을 보인다.

2. 實際風力密度

성산, 서귀지역은 이상풍력밀도의 고찰 결과로 Weibull계수 K, C값은 산술평균하여 구한 값을 이용하여 시동풍속과 정격풍속에 대한 시스템효율과 부하계수를 산출했다.

그림4는 성산, 서귀지역에서 시동풍속과 정격풍속의 비율 0.3, 0.4, 0.5로 가정했을 때 V_0/C 와 부하계수, 시스템효율과의 관계를 나타낸 것이다.

그림4(a)에서 보여주는 것처럼 성산지역에서 회전자의 단위면적당 얻을 수 있는 에너지는 V_0/V_r 이 0.3, 0.4, 0.5인 경우 각각 V_r/C 가 2.1, 2.0, 1.7일때 최대값을 가지며 또한 C값이 3,564이므로 최적시스템의 정격풍속은 각각 7.5, 7.1, 6.0m/s가 된다. 다시 말하면 V_0/V_r 가 증가하면 시스템효율이 0.88, 0.81, 0.73으로 감소하고 있으며 동시에 시스템최대효율에서 정격풍속이 감소하고 있다. 또한 그림2의 출력특성곡선으로부터 고찰할 때, V_0/V_r 의 감소는 출력곡선 중에서 이차함수 적

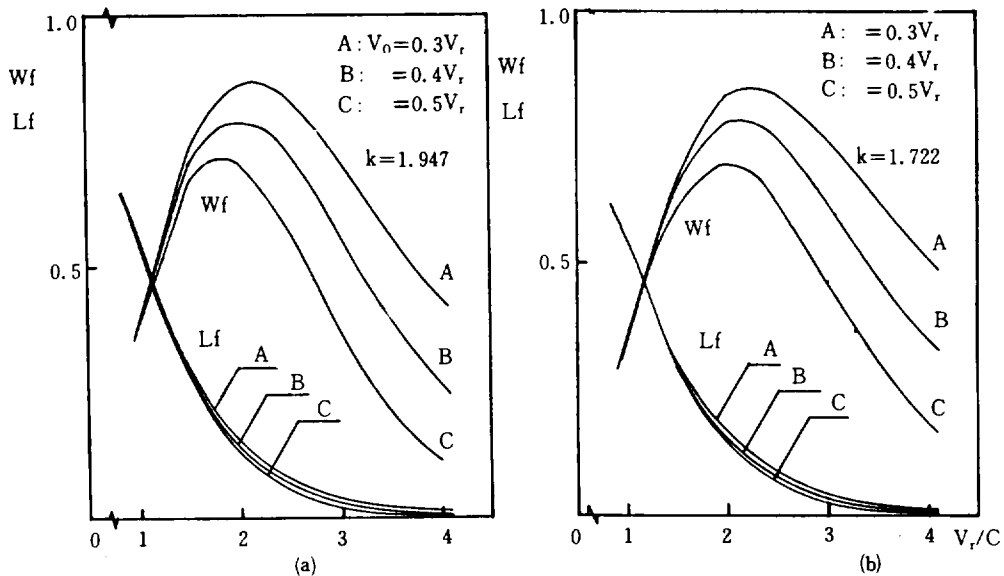


Fig. 4. Load factor and statistical efficiency as a function of V_r/C
 (a) Sungsan (1984.10~1985.7, 1985.9) (b) Seogui (1984.10~1985.7, 1985.9)

분구간의 증가를 의미함으로 정격풍속이상에서 얻을 수 있는 출력보다 시동풍속에서 정격풍속까지의 적분으로부터 얻을 수 있는 출력이 전체출력에 보다 큰 영향을 미치고 있다는 것을 보여준다. 그리고 최대효율에서 부하계수는 V_0/V_r 이 0.3, 0.4, 0.5로 증가함에 따라 0.13, 0.14, 0.20으로 증가하고 있다.

그러므로 풍력발전 설치예정지역의 풍속자료를 분석하여 Weibull계수를 산출하면 해당지역의 시스템효율이 최대가 되는 정격풍속을 산출할 수 있으며 이 때의 풍속은 실제풍력밀도를 최대로 하여 준다.

한편 그림에서 부하계수는 정격풍속이 증가함에 따라 급격하게 감소하고 있다. 그러나 풍력발전시스템에서 생산된 전력이 부하의 형태, 즉 단위전원용이나 직접 양수등에 사용되지 않고 기존전력망에 연계되어 사용된다면, 풍력발전시스템의 설계는 효율이 최대가 되는 정격풍속을 결정해야 한다.

서귀지역에 대한(그림4(b)) 시스템최대효율은 성산지역보다 V_r/C 값이 조금 큰 값에서 존재하나 C값이 성산지역에 비하여 작기 때문에 최대정격풍

속은 약간 낮다. 그리고 최대효율에서 V_0/V_r 에 대한 V_0/V_r 의 변화가 거의 없으므로 부하계수는 V_0/V_r 에 상관없이 약 0.14임을 보여 주고 있다.

이상풍력밀도를 산출한 그림3을 고찰할 때 제주 지역은 월별 평균풍력밀도의 변화폭이 심하여 1984년 12월 1985년 1,2월과 1984년 10, 11월, 1985년 3,4,5,6,7,9월로 2개 집단으로 세분화하여 V_0/V_r 에 대한 시스템효율과 부하계수를 산정하였다(그림5). 따라서 각각 2개 집단에 대한 최대효율을 갖는 시동풍속과 정격풍속을 결정한 후 실제 풍력발전시스템의 월별출력을 산출하여 최대출력으로 가정하였다. 그러나 월별풍속특성의 변화가 심한 지역에 적합한 정격 및 시동풍속을 결정하기 위하여 K.C값이 다른 위 2개 집단에 대하여 V_r 을 변화시키면서 출력을 계산하여 재차 월평균을 산출하고 이 값과 최대출력의 비율 최종효율로 하여 정격풍속을 결정하였다. 그림6은 위의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 V_0/V_r 가 0.5, 0.5, 0.3인 경우 최적정격풍속은 9.3, 10.0, 10.5m/s임을 알 수 있다.

대정지역은 제주, 성산, 서귀지역에 비해 이상 풍력밀도가 월등히 높게 나타나고 있으나, 풍속특

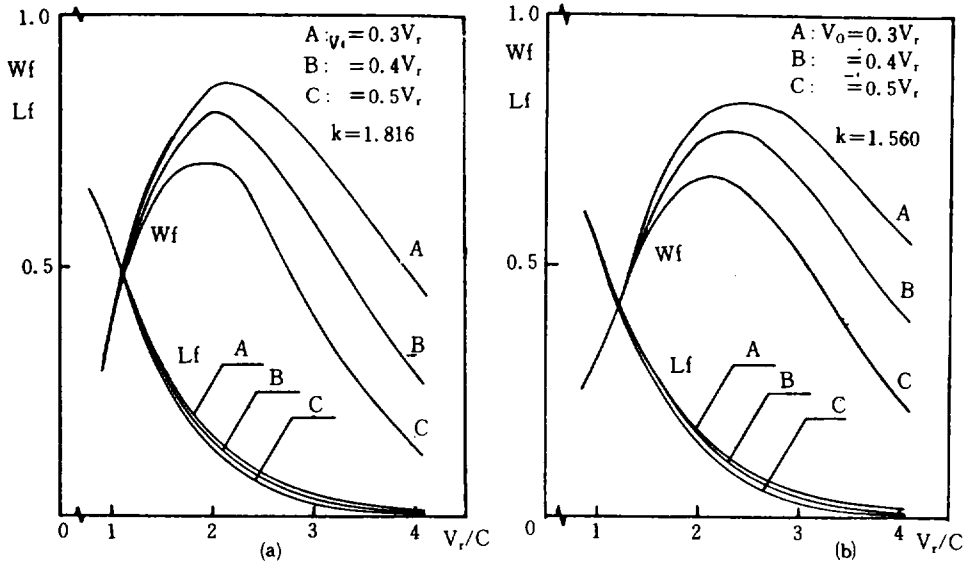


Fig. 5. Load factor and statistical efficiency as a function of V_r/C
 (a) Cheju A (1984.12, 1985.1,2) (b) Cheju B (1984.10,11, 1985.3,4,5,6,7,9)

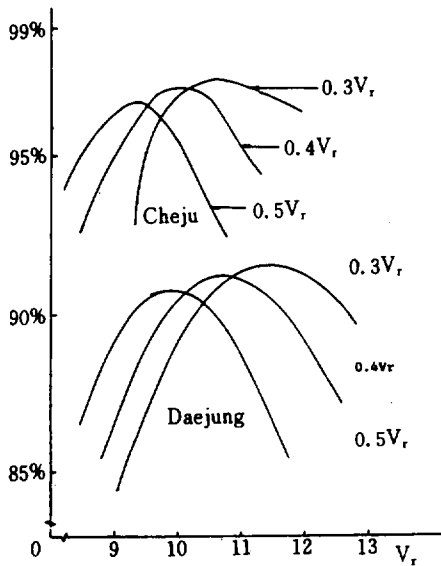


Fig. 6. Efficiency ($E/E_{max.}$) as a function of rated wind speed at Cheju and Daejung.

성에 대한 월별변화는 가장 심한 기록을 나타내므로 3개 집단(그림7)으로 분류하여 제주지역과 동일한 방법으로 최적정격풍속을 결정하였다. 그림7은 대정지역에서 정격풍속에 대한 최적효율곡선을 나타내고 있으며 이 곡선으로부터 V_0/V_r 가 0.5, 0.4, 0.3인 경우 최대정격풍속은 9.9, 10.6, 11.4m/s임을 알 수 있다. 그리고 효율곡선의 전반적인 경향은 제주지역과 비슷하나 대정지역의 최대효율은 제주지역의 것보다 현격히 낮다. 이것은 대정지역의 월별풍속특성변화가 제주지역의 것보다 심함을 의미한다.

위에서 언급된 그림4~그림7의 풍력에너지포텐셜 해석결과를 요약하여 표1에 나타내었다. 표로부터 대정A 집단은 B,C 집단보다 시스템효율 및 부하계수 값이 월등히 높고, 또한 V_0/V_r 이 0.4인 경우 대정집단에서 산출된 풍력시스템출력은 전체 출력의 54.3%임을 알 수 있으며, 이것은 출력이 1년중 겨울에 편중되어 있음을 나타내고 있다.

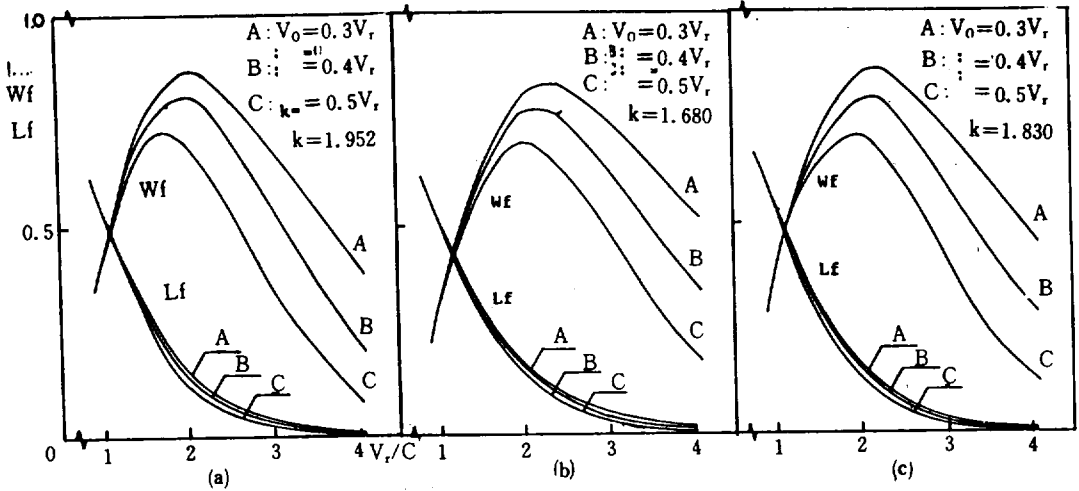


Fig. 7. Load factor and statistical efficiency as a function of V_0/V_r .
 (a) Daejung A (1984.12, 1985.1,2,3) (b) Daejung B (1984.10,11, 1985.4,5,6)
 (c) Daejung C (1985.7,9)

Table 1. Optimal rated wind speed, atual and ideal wind power density at max. statistical efficiency for Cheju, Seogui, Sungsan and Daejung stations at the height of 10m.

Statlions	K	C	Vr(Vo)	Wf	Lf	A.W.P.D	I.W.P.D
Sungsan	1.945	3.564	0.3Vr:7.5(2.2)	0.88	0.14	10.0	
			0.4Vr:7.1(2.9)	0.81	0.14	9.4	37.9
			0.5Vr:6.0(3.0)	0.73	0.20	8.5	
Seogui	1.722	3.258	0.3Vr:7.2(2.2)	0.81	0.13	8.7	
			0.4Vr:6.9(2.7)	0.71	0.14	8.1	33.8
			0.5Vr:6.5(3.3)	0.70	0.14	7.3	
Cheju A ¹⁾	1.816	5.566	0.3Vr:11.7(3.5)	0.86	0.15	41.0	
			0.4Vr:11.1(4.5)	0.81	0.15	38.2	157.1
			0.5Vr:10.6(5.3)	8.71	0.16	34.4	
Cheju B ²⁾	1.560	3.704	0.3Vr:9.3(2.8)	0.83	0.09	14.6	
			0.4Vr:8.5(3.4)	0.78	0.11	13.5	58.0
			0.5Vr:7.8(3.9)	0.68	0.23	12.0	
Deajung A ³⁾	1.952	6.112	0.3Vr:12.5(3.8)	0.88	0.14	50.8	
			0.4Vr:11.5(4.6)	0.81	0.14	47.4	190.8
			0.5Vr:11.0(5.5)	0.73	0.20	42.8	
Deajung B ⁴⁾	1.680	4.751	0.3Vr:11.0(3.3)	0.82	0.10	27.9	
			0.4Vr:10.5(4.2)	0.80	0.12	25.9	108.8
			0.5Vr:9.5(4.8)	0.70	0.14	23.2	
Deajung C ⁵⁾	1.830	4.122	0.3Vr:9.0(2.7)	0.83	0.10	15.7	
			0.4Vr:8.6(3.8)	0.73	0.10	15.4	68.2
			0.5Vr:8.6(4.3)	0.69	0.12	13.6	

1) 1984.12, 1985.1,2

2) 1984.10,11, 1985.3,4,5,6,7

3) 1984.12, 1985.1,2,3

4) 1984.10,11, 1985.4,5,6

5) 1985.7,9.

摘 要

1984년 10월부터 1985년 9월까지 1년간 제주, 서귀추후소 및 성산, 대정분소에서 측정된 풍속기록지로부터 월별, 지역별 10분평균풍속을 산출 Computer에 입력하였으며, 풍속특성해석결과를 이용하여 높이 10m인 경우 지역별 최적정격풍속

및 풍력에너지포텐살을 산정하였으며 요약하면 아래와 같다.

1. 제주도내 4개 지역에 대한 이상풍력밀도를 산출한 결과 대정지역이 가장 높고, 겨울철에 편중되어 있음을 알 수 있다.

2. 제주도내 4개 지역에 대하여 풍력발전시스템 설치시 최대효율을 갖는 최적정격풍속을 결정하였으며, 최적정격 풍력으로부터 풍력에너지포텐살을 산정하였다.

參 考 文 獻

- Justus C. G. 1979, Winds and Wind System Performance, Georgia Institute of Technology, Atlanta, pp.62-63.
- Justus, C. G. et al. 1976, *National Assessment of Potential Output from Wind-Powered Generators*, J. Applied Meteorology Vol.15, No.7, pp.673-678.
- Lalas D. P. et al, 1983, An Analysis of Wind Power Potential in Greece, *Solar Energy Vol.* 30, No.6, pp.497-505.
- Jhonson Gray L, 1978, Economic Design of Wind Electric System, *IEEE. Tr. Power Apparatus and System* Vol. PAS-97, pp.554-562.
- 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.
- Chou Karen C. et al, 1980, Simulation of Hourly Wind Speed and Array Wind Power, Dept. of Civil Engineering Northwest Univ., USA.
- Abramowitz, M. I.A. Stegun. 1965, *Handbook of mathematical functions*, Dover Pub. Inc. New York, pp.255-293.
- Excell, R. H. B. 1985, The Wind Energy Potential of Thailand *Solar Energy Vol.* 35, No.1, pp.3-13.
- Westberg, Stefan, 1983, A Strategy for Optimization of Wind Energy Systems, *Wind Engineering Vol.* 7, No.2, pp.104-114.
- 고장권·허중철, 1986, 제주도에서의 풍력에너지 이용을 위한 공학적 예측에 관한 연구(1), 제주대학교 논문집, 22:107-113.
- 이철영·신동열, 1984, 풍속자료분석에 의한 풍력발전시스템 최적설계, 태양에너지 4권 2호.
- 이철영·신동열, 1985, 풍속자료분석에 의한 국내 풍력가용량산성, 태양에너지 5권 2호.