

【 論 文 】

풍속자료 분석을 통한 풍차 출력의 최적화

Optimization of Wind Turbine Output through the analysis of Wind Data

金 建 勳** 朴 慶 浩** 申 東 烈 *

(Kim, Keon Hoon) (Park, Kyung Ho) (Shin, Dong Ryul)

(1986. 4.18 접수)

ABSTRACT

This paper deals with analytical methods for estimating the optimal design parameters of wind turbine from power output curve. Asmussen [5] has been used a linearized power output curve for an analytical expression for the specific output of wind turbine generators, but a nonlinear power output curve is developed to determine the design parameters of optimal wind turbine in this study that has maximum specific output and minimum swept area.

Thus, the design results of this research will yield reliabilities in construction of wind turbine system and detailed results are presented for several district in Korea. Although the results presented pertain to a wind turbine system without storage, the design approach is equally applicable to system with storage.

기 호 설 명			
A	: 회전자 회전면적 (m^2)	P_w	: 풍력에너지 (Kw)
B(P_r, V_r)	: 최적풍차 제한함수	q	: 식 (20)
c	: Weibull 분포의 scale parameter(m/sec)	r	: 이용율, 식 (28)
C_p	: 회전자 동력계수	s	: 비출력, 식 (17)
D	: 회전자 직경 (m)	u	: step 함수
E(P_r, V_r)	: 최적풍차 목적함수	v	: 풍속 (m / sec)
f(v)	: 확률 밀도 함수	\bar{v}	: 평균풍속 (m / sec)
G(p)	: 출력 누적 분포함수	V_c	: 시동 풍속 (m / sec)
g(p)	: 출력 확률 밀도 함수	V_f	: 종단풍속 (m / sec)
k	: Weibull 분포의 shape parameter	V_r	: 풍력발전 시스템의 정격풍속 (m / sec)
p	: 출력 (Kw)	ρ	: 공기밀도 (Kg/m^3)
P	: 풍력발전 시스템의 전력에너지 (Kw)	δ	: delta 함수
\bar{P}	: 연평균소요 전력 (Kw)	η_g	: 발전기 효율
P_e	: 회전자 출력에너지 (Kw)	η_m	: 전달장치 효율
		Γ	: Gamma 함수

I. 서론

* 正會員 : 韓國動力資源研究所
 ** 韓國動力資源研究所

풍력발전 시스템은 무한량이고 무공해의 자

연에너지인, 풍력에너지를 실용 가능한 에너지의 형태로 변환시키는 시스템이라 할 수 있으며, 최근 화석 에너지의 고갈과 석유에 대한 대체에너지로서의 이용을 위해 세계 각국에서 광범위하게 연구개발 중에 있다. 국내에서도 1974년 이후부터 풍력발전 시스템에 대한 연구가 간헐적으로 수행되어 왔으며, 주로 단위 전원공급용 소형 시스템의 현지 적용성에 대한 연구가 수행되어져 왔다.¹¹⁾ 그러나, 바람이 갖는 순간적으로 풍속 및 풍향이 바뀌는 가변성에 의해, 풍력발전 시스템의 특성연구에는 많은 제한을 갖게 된다. 따라서, 정확한 풍황조건 측정을 통해 그 지역의 풍력포텐셜에 맞는 가장 적합한 시스템의 선정 설계기준이 필요하게 된다.

시스템의 최적화 연구로서는, Smith¹⁾가 두개의 무차원 변수를 정하여 이에 대한 정격풍속이 정해졌을때, 가장 경제적인 풍력시스템을 논의하였으나 정격풍속값을 정하는 연구는 수행되지 않았다. Johnson²⁾은 Weibull 분포를 이용하여 풍력에너지 계수와 부하계수를 정격풍속의 함수로서 구해내어, 풍력에너지 계수가 최대가 되는 점에서 정격풍속을 정하여 시스템을 해석하게 되므로, 중요한 변수인 부하계수에 대한 영향은 살필 수 없게 된다. Bae³⁾에 의해 시스템의 경제성에 대한 선형계획법(Linear Programming)이 적용되었으나, 경제적인 면만을 주로 다루었으며, 비교적 간단히 Nagrial⁴⁾에 의해 시스템의 건설·운영비를 최소화 하는 시스템 해석에 비선형계획법(Non-linear Programming)이 도입 되어졌다. 또, Asmussen⁵⁾는 해석적인 방법으로 정격풍속과 평균풍속의 함수로서 풍차의 비출력(specific output)을 계산 하였으나, 출력특성곡선상에서 정격출력까지의 출력을 선형으로 가정하여 해석하였다. 河本映⁶⁾은 Asmussen에 의해 이용된 선형화된 출력특성곡선에 의해 가

장 큰 비출력을 갖게되는 풍차의 출력특성을 해석하였다.

본 연구에서는 문헌 [5, 6]에서 가정된 선형화된 출력특성곡선을 보완하여 실제의 경우처럼, 정격출력까지의 출력이 풍속의 3승에 비례하는 출력특성곡선을 이용하였다. 이 출력특성곡선에 의해 해석적으로 풍차 평균출력과 출력의 편차를 구하였다. 이어서, 연간소요 전력량을 만족하며 회전자 회전면적을 최소화 하는 최적풍차의 조건에 풍차 평균출력치를 대입하여, 풍차의 최적 정격속도와 정격출력을 구하였고, 비출력에 대한 표현식을 유도하였다. 이상의 결과를 풍황조건을 알고 있는 국내 각지역에 적용함으로써 각지역에 대한 최적풍차 설계기준을 마련할 수 있게 된다.

II. 풍력에너지 특성 곡선

공기의 질량과 속도 v 에 의해 얻어질 수 있는 풍력에너지는 다음과 같이 표현되어 진다.²⁾

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, v 는 풍속(m/sec), A 는 회전자 회전면적(m^2), ρ 는 공기의 밀도(kg/m^3)를 나타낸다.

P_w 는 회전자에 의해 기계적인 동력으로 바뀌게 되는데, 이 과정에서 회전자 동력계수 C_p , 동력전달계수 η_m 과 발전기 효율 η_g 가 포함되어 다음과 같은 실제 이용 가능한 출력 P_e 를 내게 된다.

$$P_e = C_p \eta_m \eta_g P_w \\ = C_p \eta_m \eta_g \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $C_p \eta_m \eta_g$ 는 풍속, 회전자 형태, 부하상태의 함수이나 본 연구에서는 계산의 편이를 위해 $C_p = 0.4$, $\eta_m = 0.9$, $\eta_g = 0.9$ 로 하여 $C_p \eta_m \eta_g$ 는 0.32로 일정한 상수값으로 보고 계산을 수행한다.

일반적인 풍력발전 시스템의 출력 특성 곡선은 Fig.1과 같이 표시되어 있다.

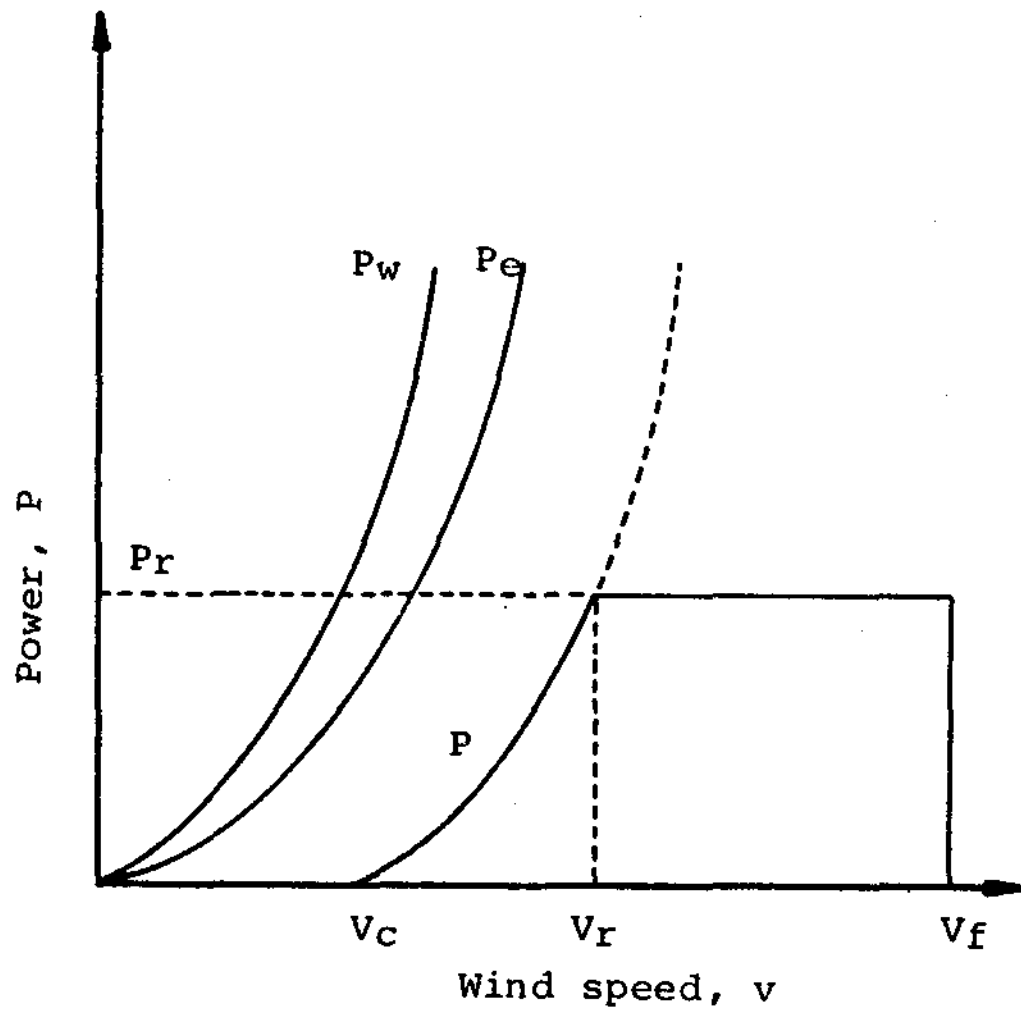


Fig. 1. Typical power output - wind velocity characteristics for wind turbine.

시동풍속 V_c 이하에서는 회전자가 기계적, 전기적 손실만을 감당하고, V_c 이상에서의 풍속에서 출력을 내게 되는데 정격풍속 V_r 에서 정격출력 P_r 을 내고, 종단풍속 V_f 이상의 빠른풍속에 대해서는 시스템을 보호하기 위해 출력을 멈추게 된다. 위에서 밝혔듯이 $C_p \eta_m \eta_g$ 를 일정한 값으로 보면 P곡선은 P_e 곡선을 풍속축 방향으로 V_c 만큼 이동시킨, 다음과 같은 특성 곡선이라 할 수 있다.

$$P = C_p \eta_m \eta_g \frac{1}{2} \rho A (v - V_c)^3 \quad (v \geq V_c) \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서, A는 P와 v의 함수이므로 이를 제거하기 위해 보간법(Interpolation)에 의해 구해지는 다음과 같은 다항식 꼴로 바뀌질 수 있다. 또, 이 과정에서 V_c 는 시동풍속으로서 보통 $1/2 V_r$ 의 값을 갖는다고 가정한다.

$$P(v) = \frac{4P_r}{V_r^3} \left[\left(v - \frac{V_r}{2} \right) \left(v - \frac{5}{6} V_r \right) \times \left(v - V_r \right) - 8 \left(v - \frac{V_r}{2} \right) \left(v - \frac{2}{3} V_r \right) \times \left(v - V_r \right) + 9 \left(v - \frac{V_r}{2} \right) \left(v - \frac{2}{3} V_r \right) \left(v - \frac{5}{6} V_r \right) \right]$$

$$\dots \dots \dots (4)$$

따라서, 전체적인 풍속분포에 대한 풍력발전 시스템의 출력특성 곡선은 다음과 같이 표시되어 있다.

$$P(v) = \begin{cases} 0 & (v < \frac{V_r}{2}, \quad v \geq V_f) \\ \frac{4P_r}{V_r^3} \left[\left(v - \frac{V_r}{2} \right) \left(v - \frac{5}{6} V_r \right) \left(v - V_r \right) - 8 \left(v - \frac{V_r}{2} \right) \left(v - \frac{2}{3} V_r \right) \times \left(v - V_r \right) + 9 \left(v - \frac{V_r}{2} \right) \left(v - \frac{2}{3} V_r \right) \left(v - \frac{5}{6} V_r \right) \right] & \left(\frac{V_r}{2} \leq v < V_r \right) \\ P_r & (V_r \leq v < V_f) \dots \dots \dots (5) \end{cases}$$

III. 풍력에너지 예측함수

풍력발전 시스템의 출력에너지를 예측하는데 이용되는 풍속확률밀도 함수는 보통 Weibull 함수가 측정치와 잘들어 맞는 것으로 밝혀진 바 있다.⁷⁾ Weibull 함수도 변수의 갯수에 따라 2변수 Weibull, 3변수 Weibull 등으로 나뉘게 되나, 보통 3변수 Weibull 함수는 복잡하고 변수치를 구하기가 힘들어 거의 이용되지 않으므로 본논문에서는 2변수 Weibull 함수를 이용하였다. 2변수 Weibull 확률밀도 함수는 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$f(v) = (k/c) (v/c)^{k-1} \exp [- (v/c)^k] \dots \dots \dots (6)$$

여기서, v는 풍속이며, c는 scale parameter로서 평균풍속에 비례하는 값을 가지며 풍속의 차원을 갖는다. k는 scale parameter로서 k=2이면 f(v)는 Rayleigh 확률밀도 함수가 된다.

확률밀도 함수 f(v)를 구간 0에서 v까지 적분한 누적분포 함수는 다음의 식과 같게 된다.

$$F(v) = \int_0^v f(v') dv'$$

$$= 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \dots\dots\dots (7)$$

여기서, 평균 풍속 \bar{v} 는

$$\bar{v} = \int_0^\infty f(v) v dv$$

$$= \int_0^\infty \frac{k}{c} v \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] dv$$

$$= c \int_0^\infty \left[\left(\frac{v}{c} \right)^k \right]^{\frac{1}{k}} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] d \left[\left(\frac{v}{c} \right)^k \right]$$

$$= c \Gamma(1+1/k) \dots\dots\dots (8)$$

여기서, \bar{v} 는 평균 풍속, Γ 는 Gamma 함수이다.

이상의 결과에서 다음의 일반적인 moment 관계식이 나오게 된다.

$$\bar{v}^n = c^n \Gamma(1+n/k) \dots\dots\dots (9)$$

즉, 어느지역의 c , k 값을 알면, n 승 풍속의 평균값을 알 수가 있는데, 측정치와 잘 일치함을 [7]에서 밝히고 있다.

IV. 풍차 평균 출력식의 유도와 해석

풍속이 식(6)과 같은 확률밀도 함수를 갖기 때문에, 풍차출력도 식(6)과 같은 확률밀도 함수에 기초하여 구해질 수 있게 된다.

우선, 풍차출력의 누적분포함수 $G(p)$ 를 구하면,

i) $p < 0$ 이거나 $p > p_r$ 일 확률은 없고

ii) $p = 0$ 일 확률

$$F(p=0) = \int_0^{V_r} f(v) dv + \int_{V_f}^\infty f(v) dv$$

$$= 1 - \exp \left[- \left(\frac{V_r}{2c} \right)^k \right] + \exp \left[- \left(\frac{V_f}{c} \right)^k \right] \dots\dots\dots (10)$$

iii) $p < P$ 일 확률 ($P < P_r$)

$$F(p < P) = \int_0^{V_r} f(v) dv + F(p=0)$$

$$= \exp \left[- \left(\frac{V_r}{2c} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] + F(p=0) \dots\dots\dots (11)$$

여기서, v 는 식(4)의 역보간법 (Inverse Interpolation)에 의해 다음과 같이 된다.

$$v = - \frac{729V_r}{16P_r^3} \left(p - \frac{P_r}{27} \right) \left(p - \frac{8}{27} P_r \right) \left(p - P_r \right) + \frac{13122V_r}{182P_r^3} p \left(p - \frac{8}{27} P_r \right) \left(p - P_r \right) - \frac{32805V_r}{2128P_r^3} p \left(p - \frac{P_r}{27} \right) \left(p - P_r \right) + \frac{729V_r}{494P_r^3} p \left(p - \frac{P_r}{27} \right) \left(p - \frac{8}{27} P_r \right) \dots\dots\dots (12)$$

iv) $p = P_r$ 일 확률

$$F(p = P_r) = \int_{V_f}^{V_r} f(v) dv$$

$$= \exp \left[- \left(\frac{V_r}{c} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{V_f}{c} \right)^k \right] \dots\dots\dots (13)$$

이상을 정리하면 풍차출력 누적분포함수 $G(p)$ 는 다음과 같이 된다.

$$G(p) = \begin{cases} 0 & (p < 0) \\ \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{V_r}{2c} \right)^k \right] + \exp \left[- \left(\frac{V_f}{c} \right)^k \right] \right\} u(0) + \exp \left[- \left(\frac{V_r}{2c} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] + \left\{ \exp \left[- \left(\frac{V_r}{c} \right)^k \right] - \exp \left[- \left(\frac{V_f}{c} \right)^k \right] \right\} u(P_r) & (0 \leq p \leq P_r) \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

$$1 \quad (P_r < p)$$

여기서, u 는 step function 이다. $G(p)$ 는 풍차출력 누적분포 함수이므로 이의 p 에 대한 미분을 통해 출력 확률 밀도함수 $g(p)$ 를 구할 수 있다.

$$g(p) = \begin{cases} 0 & (p < 0, P_r < p) \\ \{1 - \exp[-(\frac{V_r}{2c})^k] + \exp[-(\frac{V_f}{c})^k]\} \delta(0) + \frac{dv}{dp} \cdot f(v) + \{ \exp[-(\frac{V_r}{c})^k] - \exp[-(\frac{V_f}{c})^k] \} \delta(P_r) & (0 \leq p \leq P_r) \end{cases} \dots\dots\dots(15)$$

여기서, δ 는 delta 함수이다. 위식 (15)에 의해 연간 풍차발전량의 평균치를 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \int_0^\infty p g(p) dp \\ &= \int_0^\infty p \{ \{1 - \exp[-(\frac{V_r}{2c})^k] + \exp[-(\frac{V_f}{c})^k]\} \delta(0) + \frac{dv}{dp} f(v) + \{ \exp[-(\frac{V_r}{c})^k] - \exp[-(\frac{V_f}{c})^k] \} \delta(P_r) \} dp \\ &= P_r \{ \exp[-(\frac{V_r}{c})^k] - \exp[-(\frac{V_f}{c})^k] \} \\ &\quad + \frac{4c^3}{V_r^3} \int_{\frac{V_r}{2c}}^{\frac{V_r}{c}} [(t - \frac{t_r}{2})(t - \frac{5}{6}t_r)(t - t_r) - 8(t - \frac{t_r}{2})(t - \frac{2}{3}t_r)(t - t_r) + 9(t - \frac{t_r}{2})(t - \frac{2}{3}t_r)(t - \frac{5}{6}t_r)] kt^{k-1} \exp(-t^k) dt \} \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

여기서, $t_r = V_r / c$ 를 나타낸다. 위의 (16)식을 다시 정리하면

$$\bar{P} = P_r \cdot s(k, \frac{V_r}{c}, \frac{V_f}{c}) \dots\dots\dots(17)$$

이상과 같이 $k, V_r/c, V_f/c$ 의 함수인 s 를 얻을 수 있는데, 이는 시스템의 비출력(specific output) 값이 된다.

다음으로 풍차 출력의 분산정도를 알수 있는 출력표준편차를 구할 수 있게 된다.

즉, 정의에 의해 출력표준편차식은

$$\sigma_p^2 = \int_0^\infty p^2 g(p) dp - \bar{P}^2 \dots\dots\dots(18)$$

(18)식에 (15), (16)식을 대입하여 정리하면 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= P_r^2 [\exp[-(\frac{V_r}{c})^k] - \exp[-(\frac{V_f}{c})^k] \\ &\quad + 16 \frac{c^6}{V_r^6} \int_{\frac{V_r}{2c}}^{\frac{V_r}{c}} [(t - \frac{t_r}{2})(t - \frac{5}{6}t_r)(t - t_r) - 8(t - \frac{t_r}{2})(t - \frac{2}{3}t_r)(t - t_r) + 9(t - \frac{t_r}{2})(t - \frac{2}{3}t_r)(t - \frac{5}{6}t_r)]^2 kt^{k-1} \exp[-t^k] dt - s^2(k, \frac{V_r}{c}, \frac{V_f}{c})] \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

따라서, (19)식을 다시 정리하면, 풍차 출력의 분산정도를 나타내는 새로운 함수 $q(k, \frac{V_r}{c}, \frac{V_f}{c})$ 를 얻을 수 있다.

$$\sigma_p^2 = P_r^2 \cdot q(k, \frac{V_r}{c}, \frac{V_f}{c}) \dots\dots\dots(20)$$

이상의 유도된 식들에 의해, 어느 지역의 연간소요전력량 (8760 \bar{P} Kwh)을 알고, c, k 등의 풍황조건을 알면, 식 (17)에 의해 비출력과 식 (20)에 의해 풍차출력에 대한 표준편차의 정도를 알 수 있게 된다. 비출력 s 는 평균출력에 대한 정격출력의 비를 나타내므로 풍차출력의 해석에 중요하게 된다.

일반적인 풍력시스템에서는 풍속이 중단풍속 V_f 에 이르게 되면, 시스템을 보호하기 위해 운전을 멈추게 되는데 보통 20m/sec 이상의 값을 갖게 된다.

따라서, 식 (15)에서의 $\exp[-(\frac{V_f}{c})^k]$ 항은 풍속이 V_f 이상일 확률을 표시하는데 이값은 상대적으로 작은값을 지니므로 보통의 출력해석에는 무시하게 된다.

V_f 에 대한 항을 무시하면 s 는 k 와 V_r/c 만의 함수가 되므로 다음의 Fig.2. 에서와 같이 적당한 k 의 범위 (1~2.5)내에서 V_r/c 의 변화에 대한 s 의 변화를 표시할 수 있게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 V_r/c 의 변화에 대해 s 값이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 즉, 한 지역의 비출력은 풍황조건과 정격속도 V_r 에 크게 의존하는 일반적인 경향을 나타내고 있다. 또, 그림에서 k 의 값이 작은경우보다는 큰 경우에 V_r/c 의 변화에 대해 s 값이 크게 변함을 나타내고 있으므로, k 값이 큰지역에서의 정격풍속을 정하는데는 정확한 예측이 필요하게 된다. 이런현상은 Weibull 분포가 k 값이 작을때 보다는 k 값이 큰경우에 어느 한정된 풍속분포내에 밀집되기 때문에 일어나게 된다.

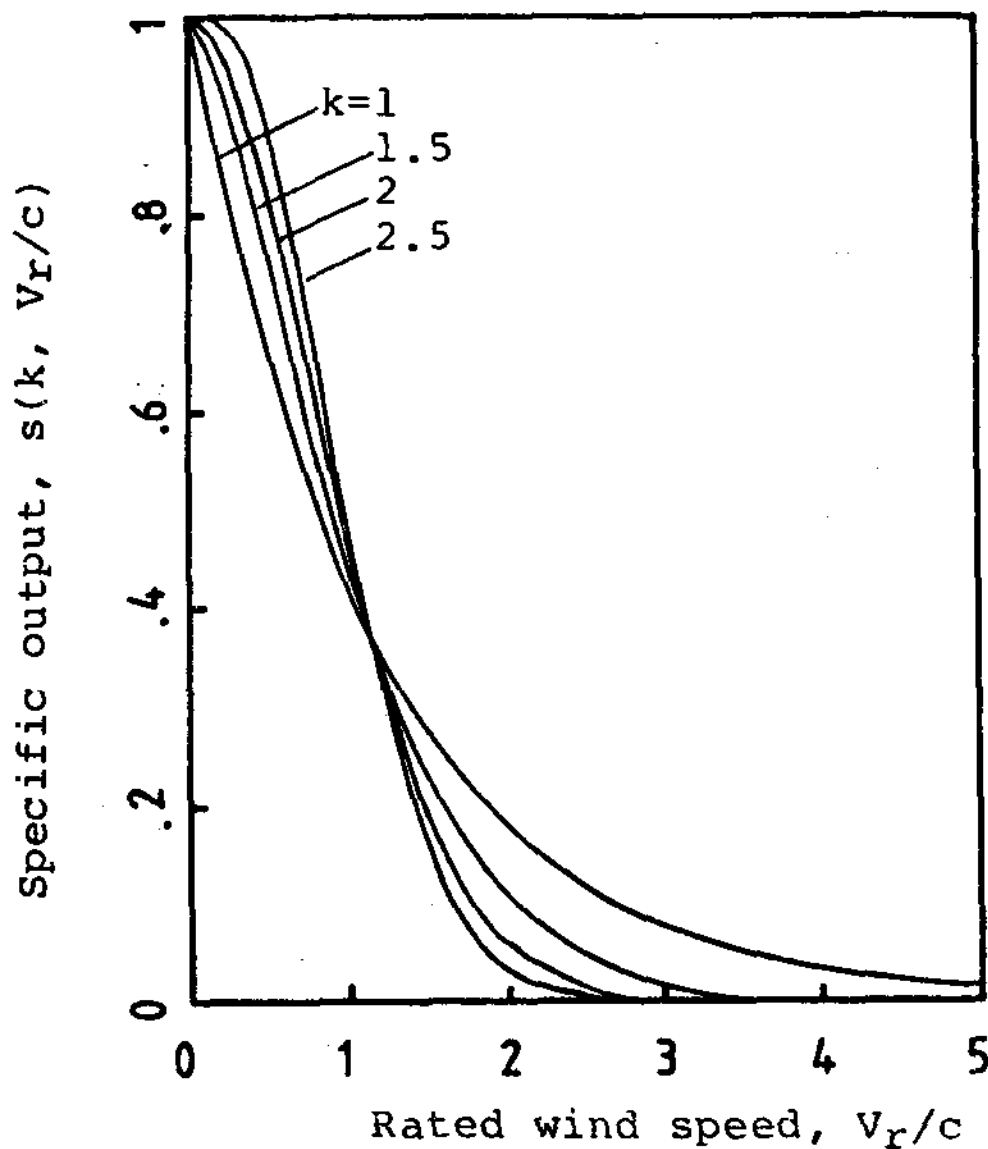


Fig. 2. Variations of s with V_r/c

다음의 Fig. 3 에서는 V_r/c 의 변화에 대한 q 의 변화를 표시하고 있는데, 이는 풍차

출력의 표준편차량에 비례하게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 어느 k 값에 대해서도 거의 V_r/c 가 1인 부근에서 최대값을 갖는데, 이는 이부근에서 출력변화가 심하게 됨을 알 수 있게 된다. 또, k 값이 커질수록 q 값이 작아지게 되는데, 큰 k 값에 대해서는 Weibull 분포함수가 좁은 풍속영역내에 집중되기 때문에, 그로인한 출력변화가 작아지므로 일어나는 현상으로 볼 수 있다. 이상을 정리하면 다음과 같이 된다.

i) V_r/c 가 작은 영역에서는 s 값이 크고, q 가 작으므로 정격출력에 가까운 평균출력을 얻게되나, 작은 정격출력 범위의 값을 갖게된다.

ii) V_r/c 가 거의 1인 부근에서는, s 값이 0.5정도이고 q 가 최대치를 갖게 되므로, 정격출력의 1/2정도의 평균출력을 내게되나, 그 출력변화가 매우 심하게 된다.

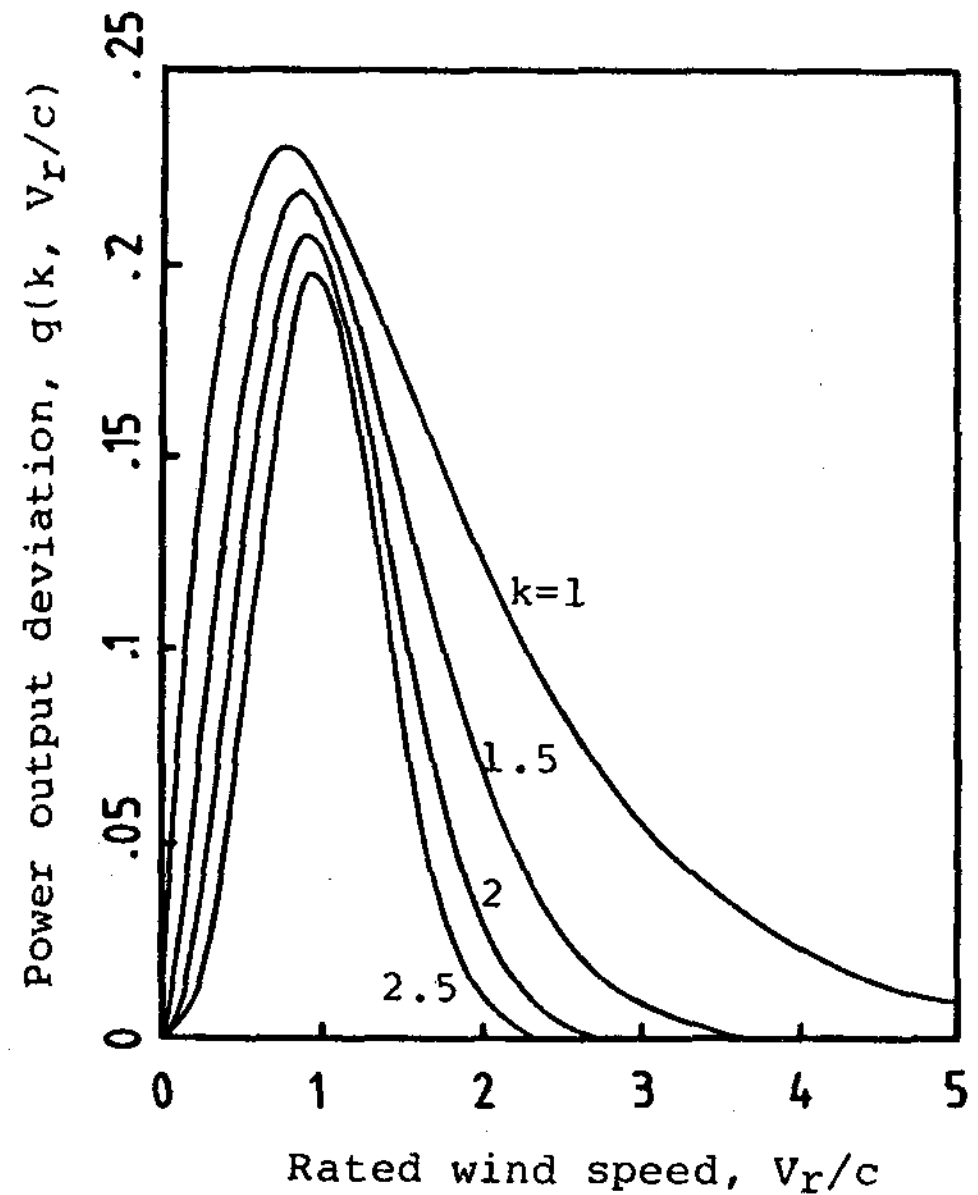


Fig. 3. Variations of q with V_r/c

iii) V_r/c 가 큰경우에는 s 값이 작고, q 값도 작으므로, 출력의 변화는 심하지 않으나, 비출력이 현저히 떨어지게 된다.

V. 최적풍차의 설계

본절에서는 어느지역의 풍황조건과 연간 소요전력량을 만족하는 동시에 제한조건을 만족하는 최적풍차의 설계에 관해 논하고자 한다. 우선, 최적풍차의 제한조건으로는 회전자 회전면적으로 정하였는데, 회전자 회전면적은 전체적인 풍력발전시스템의 규모를 정해 줄 뿐만 아니라, 회전자 회전면적의 최소화는 시스템 건설비의 절감을 초래하여 풍력발전 시스템의 경제성을 높히는데 기여할것이다. 우선, 정격풍속시의 정격출력은 다음과 같이 표시되어 진다.

$$P_r = \frac{1}{2} C_p \eta_m \eta_g \rho V_r^3 A \dots\dots\dots (21)$$

여기서, $C_p \eta_m \eta_g$ 를 상수로 보면, 회전자 회전면적 A 는 P_r 과 V_r 의 함수로서 다음과 같은 최소화해야할 목적함수 (objective function) 가 된다.

$$E (P, V_r) = \frac{2}{C_p \eta_m \eta_g} \frac{P_r}{V_r^3} \dots\dots\dots (22)$$

앞서 설명한 바에의해 식 (17)에서 V_f 항을 무시하고, 풍황조건을 대입하면 평균출력값 \bar{P} 는 P_r, V_r 만의 함수가 되고, 최적풍차의 조건으로서 연간소요전력과 풍차평균출력을 같다고 놓을 수 있게 된다.

즉, 최적풍차의 제한조건은

$$B (P_r, V_r) = \bar{P} - P_r \cdot s (V_r) = 0 \dots\dots (23)$$

여기서, \bar{P} 는 연간소요평균전력으로서 상수가 된다.

따라서, 최적풍차는 식 (23) 을 만족하면서 식 (22) 을 최소화하는, 즉 가장 작은 회전면적을 갖게 된다. 식 (23) 을 만족하면서 식 (22) 을 최소화함으로써 하는 필요조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial P_r} \cdot \frac{\partial B}{\partial V_r} - \frac{\partial E}{\partial V_r} \cdot \frac{\partial B}{\partial P_r} = 0 \dots\dots\dots (24)$$

식 (24) 에 식 (22, 23) 을 대입하여 정리하면 다음과 같이 최대 비출력을 갖으며 동시에

최소 회전자 회전면적을 갖는 풍차의 정격풍속에 관한 조건식이 유도가 된다.

$$\frac{k}{V_r^2} \left(\frac{V_r}{c} \right)^k (V_r^2 - c^2) - 3 = 0 \dots\dots\dots (25)$$

즉, 윗식 (25) 은 V_r 만의 함수가 되므로, 회전자 회전면적을 최소화하며, 가장 높은 비출력 값을 가지므로 단위 회전면적당 최대의 출력을 낼 수 있는 최적풍차의 정격풍속을 구해낼 수가 있게 된다. 다음의 Fig. 4에서 k 값의 변화에 대해 구해진 V_r/c 값의 변화를 보이고 있다. 이렇게 구해진 최적정격풍속을 식 (17)에 대입하면, 최적정격풍속에 대한 최적정격출력을 정할 수 있게 된다. 또, 구해진 V_r 과 P_r 값을 식 (22)에 대입하게 되면, 구해진 정격풍속과 정격출력하에서 단위회전면적당 최대의 출력을 갖는 풍차회전면적을 구할 수 있게 된다. 또, 구해진 식 (20)에 의해 풍차출력의 분산정도를 쉽게 예측할 수 있게 된다.

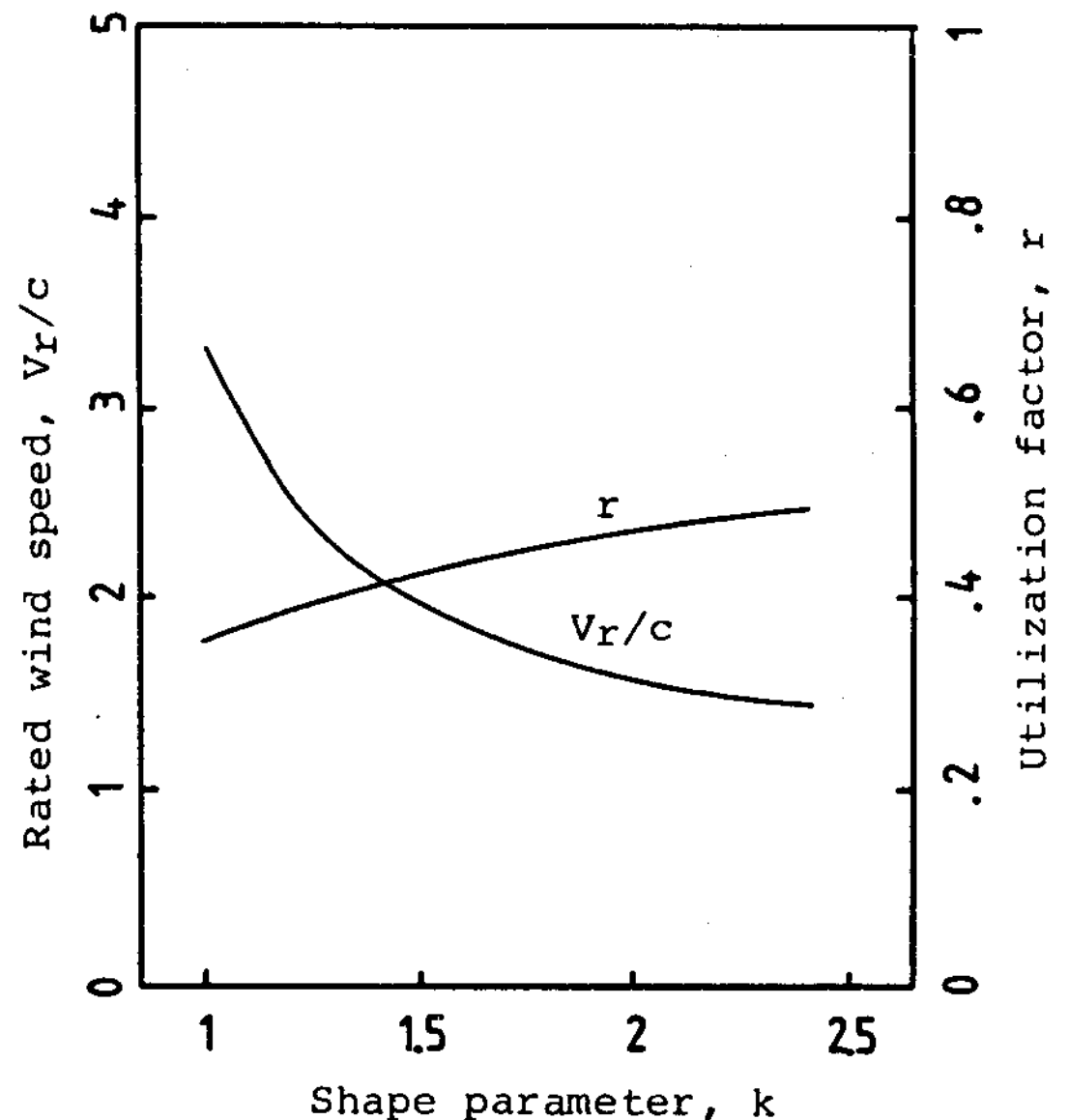


Fig. 4. Rated wind velocity V_r/c and utilization factor r of optimum wind turbine

다음으로, 최적풍차의 이용률을 구하게 되는데, 최적풍차의 회전면적이 A 일때 이를 통과하는 풍력에너지의 평균치는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_w &= \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 \\ &= \frac{1}{2} \rho A c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

최적풍차출력의 평균값 \bar{P} 는 식(17)에 의해 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_o &= \bar{P}_r \cdot s(k, V_r/c) \\ &= \frac{1}{2} C_p \eta_m \eta_g \rho A V_r^3 \cdot s(k, V_r/c) \end{aligned}$$

..... (27)

따라서, \bar{P}_w 와 \bar{P}_o 의 비를 이용률이라 정의하면,

$$\begin{aligned} \text{이용률} &= \frac{\bar{P}_o}{\bar{P}_w} = C_p \eta_m \eta_g \left(\frac{V_r}{c}\right)^3 \frac{s(k, V_r/c)}{\Gamma(1+3/k)} \\ &= C_p \eta_m \eta_g \cdot r \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

$C_p \eta_m \eta_g$ 를 상수로 본다면, 이용률은 r 에 비례하게 된다. Fig. 4에서 k 의 변화에 대한 r 의 변화를 보이고 있다.

그림에서 볼수 있듯이 동일 c 값에 대해서, k 값이 커짐에 따라 정격풍속을 작게 설정하는 것이 시스템의 이용률을 높이게 된다. 이는 k 값이 큰 경우에는 비교적 빠른 풍속분포에 밀집되므로, 정격풍속을 비교적 작게 정하여 밀집된 풍속분포를 이용하는 것이 효과적임을 보이고 있다. 또, 낮은 k 범위에서는 비교적 고르게 풍속분포가 이루어지기 때문에, 높은 풍속분포 영역을 이용하는 것이 높은 이용률을 유지하게 하는 것임을 알수 있다. 여기서, r 의 변화는 k 의 값이 커짐에 따라 거의 비례적으로 커지고 있음도 나타내고 있다.

Ⅵ. 최적풍차의 적용

이상에서 유도된 방법에 의해, 풍황조건을 아는 국내 몇지역에 대한 계산을 수행하였다. 연간 소요전력량과 c , k 값으로서 식(9)에 의해 평균풍속 \bar{v} 와 \bar{v}^3 을 구할수 있고, 식(25)에 의해 회전면적을 최소로 하는 최적풍차의 정격풍속을 정하고, 다시 식(17)에 의해 정격출력을 계산할 수 있게 된다.

식(22)에 의해 최적풍차의 최소회전면적이 구해지고, 평균출력에 대한 표준편차가 식(20)에 의해 구해지게 된다. 이상의 결과가 다음의 Table 1에 정리 되었다. 정격풍속은 평균풍속이 커짐에 따라 커지고 있고, 출력편차는 줄어들어 알수가 있다. 또, k 값이 작아지면 평균풍속도 작아지고, 더불어 시스템 이용률도 줄어들고 있다.

Fig.5 에는 제주지방의 연간누적출력전력량에 대한 회전자 직경과 정격출력량을 표시하고 있다. 즉, 어느지역의 소요평균전력량을 알면, 그에 대한 회전자 크기 및 발전기의 정격용량을 쉽게 정할 수 있게 되므로 최적용량의 시스템에 대한 기초 설계자료로서 이용될 수 있게 된다.

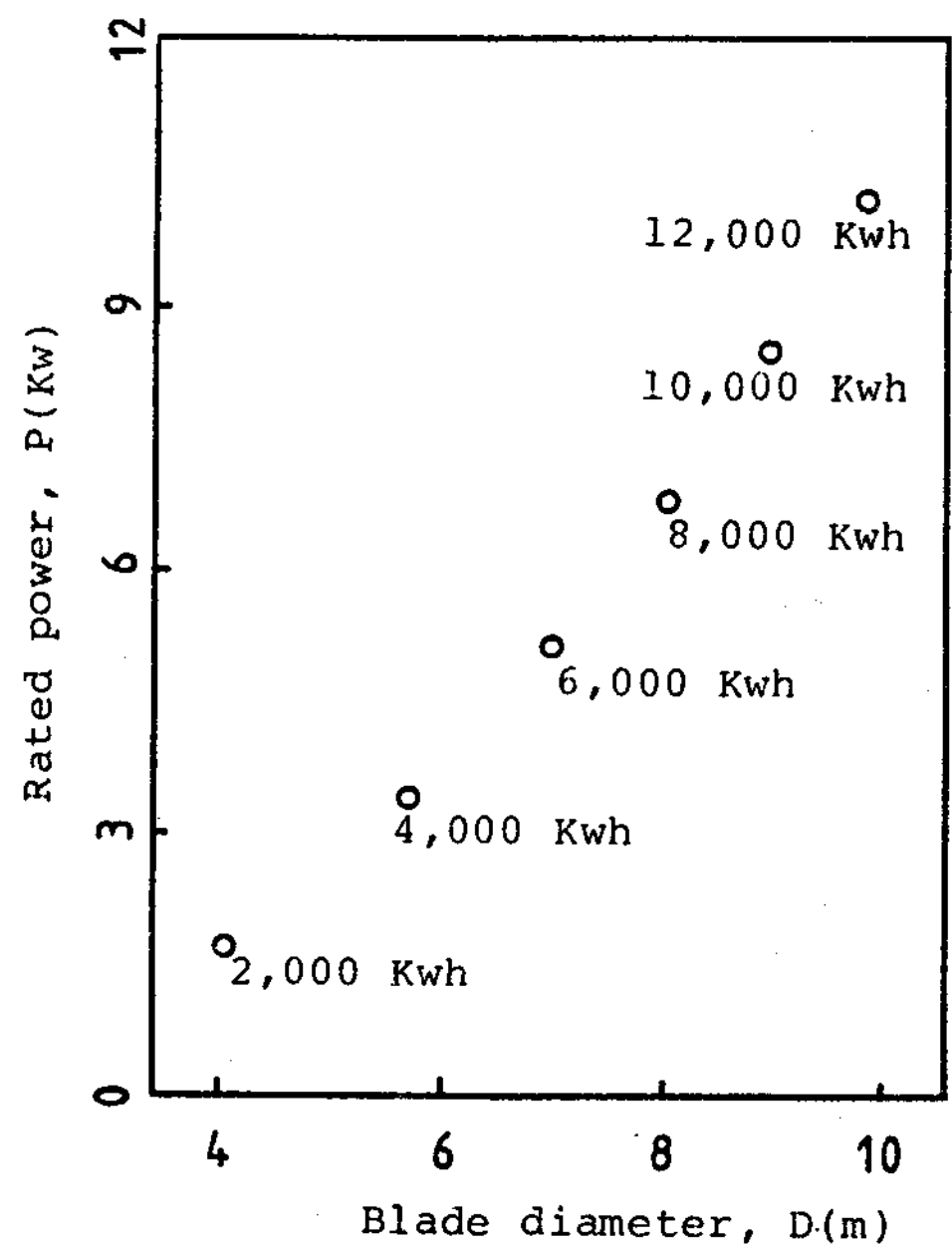


Fig. 5. Variation of rated power P and blade diameter D of optimum wind turbine with annual energy at Jeju.

Ⅶ. 결 론

어느지역의 풍황조건을 알게 되면, 가장 높은 이용률을 갖는 동시에 시스템의 경제성에 관계된 회전자의 크기를 최소로 하는 최적풍차를 결정하는 해석적인 방법이 정리되었다. 이의 해석

(Table 1) Wind characteristics and optimum wind power system design parameters for several district in Korea.

지명	구분	c (m/sec)	k	E (kwh)	\bar{v}	\bar{v}^3	V_r	P_r	D (m)	s	q	r
인천	천	4.933	1.935	5,000	4.372	164.7	7.94	3.73	6.97	0.153	0.093	0.463
군산	산	5.003	1.671	5,000	4.467	208.9	8.91	4.37	6.34	0.13	0.084	0.441
목포	포	4.763	1.406	5,000	4.334	243.4	9.83	5.37	6.06	0.106	0.073	0.414
여수	수	4.234	1.517	5,000	3.813	147.8	8.14	4.88	7.67	0.117	0.078	0.426
제주	주	5.038	1.706	5,000	4.495	206.7	8.82	4.26	6.35	0.134	0.086	0.445
서귀포	포	4.149	1.632	5,000	3.715	124.0	7.53	4.49	8.26	0.127	0.083	0.437
충무	무	3.189	1.195	5,000	3.001	107.9	7.93	6.84	9.44	0.083	0.06	0.386
부산	산	4.945	1.785	5,000	4.403	183.8	8.39	4.05	6.68	0.141	0.089	0.452
울산	산	2.643	1.235	5,000	2.463	56.0	6.29	6.48	13.0	0.088	0.063	0.391
포항	항	3.879	1.514	5,000	3.500	115.4	7.50	4.89	8.69	0.116	0.078	0.425
울릉도	도	5.009	1.505	5,000	4.519	248.5	9.70	4.92	5.92	0.116	0.078	0.425
강릉	릉	3.483	1.544	5,000	3.132	80.4	6.62	4.80	10.37	0.119	0.079	0.428
속초	초	3.880	1.585	5,000	3.481	105.5	7.19	4.62	9.0	0.123	0.081	0.433

과 적용의 결과로서 다음과 같이 정리될 수 있다.

(1) 기존의 계산은 풍차출력 특성곡선을 선형화하여 해석하였으나, 본 연구에서는 풍력발전 시스템의 특성중 평균출력과 정격출력의 제 곱에 비례하는 분산정도치를 해석적으로 구하여 도식화함으로서, 실제 풍차설계시 최적화가 가능케 되었다.

(2) 임의의 풍황조건에서는 적용될 수 있는 최적 풍차 설계기준을 마련하였다.

즉, 어느지역의 풍황조건과 연간평균소요 전력량에 대해서, 가장 높은 경제성과 이용률을 갖게 되는 최적 풍차의 정격 풍속, 정격출력, 회전자 회전면적, 이용률과 출력의 분산정도치 등이 쉽게 구하여 질 수 있다.

(3) 풍력발전시스템의 최적화는 정확한 예측을 통한 비출력의 최대화로서 가능하며, 우리 나라 각지역의 풍황조건에 의해 구해진 최적시스템의 기본제원을 정리하였다.

References

1. Mahlon C. Smith, "Wind Power System Optimization," IECEC '75 RECORD, 1975.
2. G. L. Johnson, "Economic Design of Wind Electric Systems," IEEE T. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 97, No.2, 1978.
3. H. M. Bae, "Optimization Models for the Economic Design of Wind Power Systems," Solar Energy, Vol. 20, pp. 469-481, 1978.
4. M. H. Nagrial, "A Nonlinear Programming Approach to the Design of Wind Power System," Wind Engineering, Vol. 8, No. 4, 1984.
5. J. Asmussen, D. Manner, and G. L. Park, "An Analytical Expression for the Specific Output of Wind Turbine Generators," IEEE, pp. 1295-1298, 1978.

6. 河本映, 榊原建樹, 榎本茂正, “風速統計に基べく 風車出力解析” 日本電氣學會, 卷 3 號, 1985
7. G. J. Bowden, P. R. Barker, V. O. Shestopal and J. W. Twidell, “The Weibull Distribution Function and Wind Power Statistics,” Wind Engineering, Vol. 7, No. 2, 1983.
8. S. Westberg, “A Strategy for Optimization of Wind Energy Systems,” Wind Engineering, Vol. 7, No. 2, 1983
9. M. J. M. Stevens and P. T. Smulders, “The Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Utilization Purposes,” Wind Engineering, Vol. 3, No. 2, 1979.
10. W. H. Beyer, “CRC Standard Mathematical Tables,” CRC Press, 27th ed., 1984.
11. 신동열, 이철형, 박경호, 김건훈, 김효태, “풍력발전기술개발,” KE-85-10, 연구보고서, 한국동력자원연구소, 1985