

碩 士 學 位 論 文

풍력발전기의 설비이용률 계산을 위한
확률밀도함수의 비교



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

電氣工學 專攻

姜 宅 根

2 0 0 3

碩 士 學 位 論 文

풍력발전기의 설비이용률 계산을
위한 확률밀도함수의 비교

指導教授 左 宗 根



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

姜 宅 根

2 0 0 3

풍력발전기의 설비이용률 계산을 위한 확률밀도함수의 비교

指導教授 左 宗 根

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2003年 6月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科 電氣工學 專攻



姜宅根의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2003年 6月 日

審査委員長	_____	印
委 員	_____	印
委 員	_____	印

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 확률밀도함수와 설비이용률	3
1. 확률밀도함수	3
2. 설비이용률	6
III. 분석결과	9
IV. 결 론	17
참고문헌	18

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Block diagram of basic wind electric system	6
Fig. 2 Comparison of computed frequency by Rayleigh function and measured frequency	13
Fig. 3 Comparison of computed frequency by Weibull function and measured frequency	15



LIST OF TABLES

Table 1 Monthly and annual means and standard deviations of wind speed data of Kimnyung	10
Table 2 Computed monthly and annual capacity factors	11



Comparison of Probability Density Functions for Calculation of Capacity Factors of Wind Turbine Generator

Taeg-Geun Kang

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL
ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY



Supervised by professor Chong-Keun Jwa

SUMMARY

The Weibull probability density function and the Rayleigh function are compared by analyzing the capacity factors which are computed using the probability density functions with different mean wind speeds. For this analysis, the wind speed means of arithmetic, root mean square, cubic mean cuberoot, and standard deviations are computed from the measured wind speed data of a specific site and the coefficients of

probability density functions are calculated. The capacity factors for Vestas 850[kW] wind turbine are calculated and analyzed. The results show that the wind speed frequency curve by Rayleigh function is more close to the actual curve than by Weibull function. The more the wind speed frequency curve is close to the actual one, the more the capacity factors become large values.



I. 서 론

어떤 지점의 풍력 발전시스템을 설치하고자 할 때 풍력 포텐셜의 정확한 평가에 대한 기법개발이 점차 중요성을 얻고 있다. 이것은 풍력발전 시스템의 계획과 설치가 풍속 빈도특성과 풍차의 속도특성 즉, 시동풍속, 정격풍속, 종단풍속, 그리고 허브의 높이와 같은 요소에 의존하기 때문이다. 잠재적인 풍력지점에 대한 풍력자원의 상세한 자료가 알려지면 풍력발전시스템의 효율적 설계시 더 높은 출력을 얻기 위해 설치지점에서의 최적풍차선정이 요구되고 있다(Jangamshetti and Rau, 1999).

이와 관련하여 풍력발전시스템의 에너지원가분석에 대한 미국전력연구소(Electric Power Research Institute)의 기술평가지침(TAG)에 의하면 평가요소로서 경제적 제요소 이외에 풍향과 풍차와의 적합성을 평가하는 설비이용률도 포함되어 있다(Richardson and McNerney, 1993). Johnson(1978)은 풍력발전시스템의 경제적 설계에 산술평균을 사용하여 풍속빈도곡선을 연속함수로 모델링한 Weibull 확률밀도함수로 설비이용률을 계산하여 평가하고, Kawamoto (1985) 등은 산술평균풍속에 의한 3승평균풍속으로 Weibull 함수를 사용하여 최적풍차선정에 대하여 검토하였다. Salameh와 Safari(1992)는 세제곱평균풍속으로 Weibull 함수와 Rayleigh 함수로 설비이용률을 구하여 평가하였고, Jangamshetti와 Rau는 평균풍속으로 산술, 제곱, 그리고 세제곱 평균치를 사용하여 Weibull함수와 Rayleigh함수에 의하여 설비이용률을 계산하고 실측설비이용률과 비교함으로써 세제곱 평균풍속을 사용한 Weibull함수에 의한 결과가 실측결과에 더 접근함을 보이고 있다. 그러나 이들의 연구에서는 평균풍속의 종류에 따른 확률밀도함수와

설비이용률의 관계가 비교 분석되어 있지 않다.

본 논문에서는 제주도 북제주군 구좌읍 김녕리 해안에서 실측한 1년간의 풍속자료(허종철외, 2001)를 가지고 산술, 제곱, 그리고 세제곱 평균풍속과 표준편차를 구하여 Weibull함수와 Rayleigh함수의 계수들을 결정하고 Vestas 850[kW] 풍력발전기를 대상으로 설비이용률을 계산하였다. 실측한 풍속빈도곡선과 각 확률밀도함수의 평균풍속에 따른 풍속빈도곡선을 비교하여 설비이용률과의 관계를 분석하여 Weibull함수와 Rayleigh함수를 비교하였다.



II. 확률밀도함수와 설비이용률

1. 확률밀도함수

바람은 높은 가변동력원으로 이 가변성을 특성화하는 가장 일반적인 것은 전력지속곡선이지만 주어진 풍력조사지점의 중요한 설계 요구 자료인 시동풍속과 정격풍속을 선택하는 것이 쉽지 않다.

다른 방법으로는 통계적인 표현방법으로 풍속빈도곡선을 연속함수로 모델링한 확률밀도함수를 사용하는 것이다. 풍력연구에 흔히 사용되는 함수로는 Weibull 확률밀도함수와 Rayleigh 확률밀도함수가 있다.

이들 확률밀도함수를 사용하기 위해서는 풍력조사지점에 설치할 풍차의 허브 높이에서의 풍속이 필요하지만 조사지점에서 풍속은 허브 높이와 다르고 이보다 낮은 두 위치에서 보통 측정된다.

따라서 두 위치에서 측정된 풍속을 허브높이로 외삽에 의해 경신하여야 한다. 이를 위한 역승법칙은

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad (1)$$

이고, 여기서 v_1 과 v_2 는 각각 z_1 과 z_2 높이에서의 측정 풍속이며, α 는 역승법칙의 지수이다. 그러므로 (1)식으로부터 α 는 다음과 같이 정해진다.

$$a = \frac{\log\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{\log\left(\frac{z_2}{z_1}\right)} \quad (2)$$

풍차의 허브높이를 z 라 하면, 외삽에 의한 이 높이에서의 풍속 v 는

$$v = v_2 \left(\frac{z}{z_2}\right)^a \quad (3)$$

로 구할 수 있다.

Weibull함수는 2개의 계수를 가지는 함수로

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4)$$

으로 주어지고, 여기서 k 는 형상계수이고 c 는 척도계수이다.

Weibull함수를 사용한 평균풍속과 분산을 단순화한 식으로부터 구한 근사 형상계수와 척도계수는

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{ave}}\right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = \frac{v_{ave}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (6)$$

를 사용하고, 여기서 σ 는 표준편차를, v_{ave} 는 평균풍속을, 그리고 Γ 는 감마함수를 나타낸다.


Rayleigh 함수는 1개의 계수를 가지는 함수로

$$f(v) = \frac{k}{c^2} e^{\left(-\frac{v^2}{2c^2}\right)} \quad (7)$$

으로 주어지고, 계수 c 는 다음과 같이 주어진다.

$$c = \frac{v_{ave}}{1.253} \quad (8)$$

또한 각 확률밀도함수의 계수를 구하기 위한 평균풍속과 표준편차는



$$v_{ave} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N f_i v_i^n}{\sum_{i=1}^N f_i} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N f_i (v_i - v_{ave})^2}{\sum_{i=1}^N f_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

이고, 여기서 N 은 기록된 풍속의 수이고, f_i 는 풍속의 빈도이며, (9)식에서 v_{ave} 는 n 이 1, 2, 3일 때 각각 산술평균 (v_a), 제곱평균 (v_r), 그리고 세제곱평균 (v_c)을 나타낸다.

2. 설비이용률

풍력발전기의 설비이용률은 평균출력전력 P_{ave} 와 정격출력전력 P_r 의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$CF = \frac{P_{ave}}{P_r} \quad (11)$$

기본적인 풍력발전시스템의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 P_w 는 풍차입력, P_m 과 ω_m 은 풍차 출력과 각속도, P_t 와 ω_t 는 발전기 입력과 각속도, 그리고 P_e 와 ω_g 는 발전기 출력과 전기 각속도이다.

또한 C_p 는 풍차의 동력계수, η_m 은 동력전달장치의 효율, 그리고 η_g 은 발전기의 효율이다.

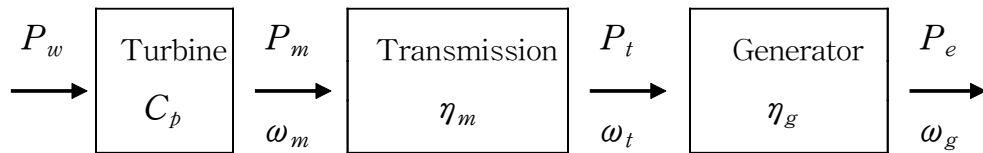


Fig. 1 Block diagram of basic wind electric system

Fig. 1으로부터 출력전력은

$$P_e(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v^3 \quad (12)$$

으로 주어지고, 여기서 ρ 는 공기밀도, A 는 바람이 지나가는 풍차 단면적이다.

발전기의 평균출력전력은 모든 발전 가능 풍속에 걸쳐서 각 풍속에서 발생된 전력과 풍속확률밀도함수를 곱한 값의 적분으로

$$P_{ave} = \int_0^{\infty} P_e(v)f(v)dv \quad (13)$$

로 주어진다. 풍속과 출력과의 관계식인 (12)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_e(v) = \begin{cases} 0 & : v < v_{ci} \\ \frac{1}{2} \rho AC_p \eta_m \eta_g v^3 & : v_{ci} < v < v_{rat} \\ \frac{1}{2} \rho AC_p \eta_m \eta_g v_{rat}^3 & : v_{rat} < v < v_{co} \\ 0 & : v < v_{co} \end{cases} \quad (14)$$

여기서 v_{ci} , v_{rat} , v_{co} 는 각각 발전기 특성곡선에서의 시동풍속, 정격풍속 그리고 종단풍속이다. 따라서 발전기의 평균출력전력은

$$P_{ave} = \int_{v_{ci}}^{v_{rat}} \frac{1}{2} \rho AC_p \eta_m \eta_g v^3 f(v)dv + \int_{v_{co}}^{v_{rat}} \frac{1}{2} \rho AC_p \eta_m \eta_g v_{rat}^3 f(v)dv \quad (15)$$

가 된다.

또한 발전기의 정격출력전력은 정격풍속에서 발생된 전력이므로

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v_{rat}^3 \quad (16)$$

이 된다.

(15)식과 (16)식을 (11)식에 대입하면

$$CF = \frac{1}{v_{rat}^3} \int_{v_{ci}}^{v_{rat}} v^3 f(v) dv + \int_{v_{rat}}^{v_{co}} f(v) dv \quad (17)$$

로 설비이용률을 구할 수 있다. 이 식에서 $f(v)$ 는 (4), (7)식의 확률밀도함수이다.



Ⅲ. 분석 결과

풍력발전시스템의 설치 전 사전평가의 하나로 풍황과 풍차와의 적합성을 평가하는 설비이용률과 이 설비이용률을 계산하기 위한 Weibull 확률밀도 함수와 Rayleigh 확률밀도함수를 비교한다.

이를 위하여 풍속자료로서 제주도 북제주군 구좌읍 김녕리 해안가에서 1년간 측정된 15[m]와 30[m] 지점에서의 풍속을 Vestas사의 출력 850[kW] 풍력발전기의 허브높이 50[m]로 외삽한 자료를 사용하였다. 이 발전기의 출력-풍속특성에서부터 시동풍속은 3.5[m/s], 정격풍속은 15[m/s], 그리고 종단풍속은 25[m/s]로 하여 설비이용률을 계산하였다.

각 확률밀도함수의 계수들을 결정하기 위하여 평균풍속과 표준편차를 (9)식과 (10)식을 이용하여 산술평균 (v_a), 제곱평균 (v_r) 그리고 세제곱평균 (v_c)을 계산하여 Table 1에 보였다.

Table 1 Monthly and annual means and standard deviations of wind speed data of Kimnyung

Month	arithmetic mean		root mean		cubic mean	
	$v(m/s)$	σ	$v(m/s)$	σ	$v(m/s)$	σ
Jan	9.5913	3.9285	10.3647	4.0039	10.9660	4.1620
Feb	9.2880	3.9658	10.0993	4.0479	10.8252	4.2532
Mar	8.1229	4.2373	9.1617	4.3628	10.0994	4.6756
Apr	6.7034	3.3424	7.4905	3.4339	8.1707	3.6503
May	5.4354	2.4351	5.9560	2.4901	6.3981	2.6185
Jun	5.2159	2.7769	5.9091	2.8621	6.5240	3.0696
Jul	4.9697	3.0546	5.8334	3.1743	6.8183	3.5704
Aug	5.5672	3.1757	6.4093	3.2855	7.3163	3.6256
Sep	6.4569	4.1805	7.6921	4.3591	8.7522	4.7691
Oct	5.9758	2.6486	6.5364	2.7073	7.0419	2.8551
Nov	7.3437	3.6953	8.2210	3.7980	8.8987	4.0092
Dec	8.3951	3.9215	9.2659	4.0171	9.9821	4.2305
Annual	6.9072	3.8164	7.8914	3.9412	8.7669	4.2454

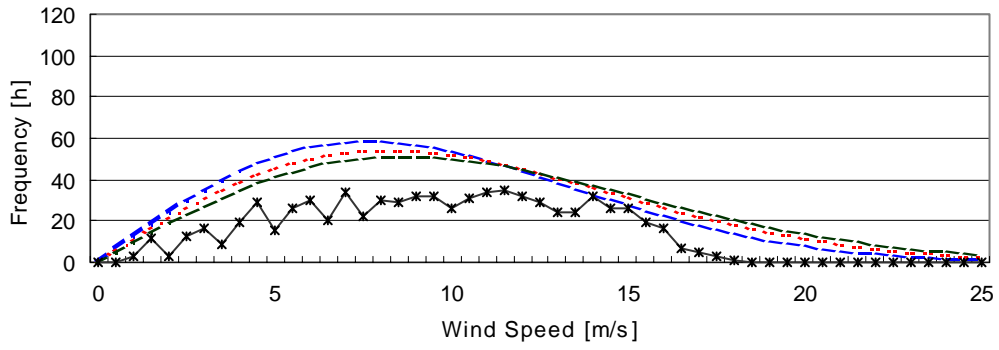
Table 1의 평균풍속과 표준편차에 의한 Weibull함수와 Rayleigh함수를 사용하여 (16)식에 의하여 계산한 월 및 년 설비이용률을 Table 2에 보였다.

Table 2 Computed monthly and annual capacity factors

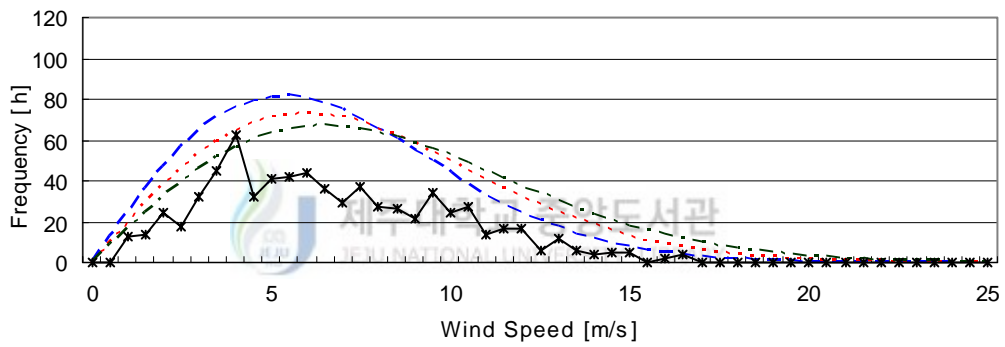
Month	Rayleigh			Weibull		
	a. m.	r. m.	c. m.	a. m.	r. m.	c. m.
Jan	0.3548	0.3995	0.4298	0.3508	0.4112	0.4591
Feb	0.3358	0.3849	0.4231	0.329	0.3907	0.4476
Mar	0.2574	0.3276	0.3849	0.2564	0.3252	0.3916
Apr	0.1613	0.2137	0.2608	0.1548	0.1985	0.2458
May	0.0889	0.1162	0.1422	0.0763	0.0956	0.1169
Jun	0.0786	0.1136	0.1499	0.0792	0.1052	0.1373
Jul	0.0678	0.1095	0.1687	0.0803	0.1124	0.1676
Aug	0.0955	0.1429	0.2018	0.1029	0.1395	0.1949
Sep	0.1458	0.2276	0.3005	0.1671	0.2334	0.3012
Oct	0.1174	0.1507	0.1834	0.101	0.1257	0.1546
Nov	0.2037	0.2642	0.3103	0.1984	0.2529	0.3023
Dec	0.2762	0.3344	0.3781	0.267	0.3282	0.383
Annual	0.1745	0.2414	0.3015	0.1793	0.2362	0.2973

Table 1의 평균풍속으로 (8)식의 계수를 결정하고 (7)식의 Rayleigh 함수와 4계절의 중심달인 1월, 4월, 7월, 10월 그리고 1년의 총 빈도수를 가지고 계산한 풍속빈도곡선을 Fig. 2에 보였다. Table 1의 평균풍속과 표준편차로 (5)식과 (6)식의 계수를 결정하고 (4)식의 Weibull 함수와 위의 총빈도수로 계산한 풍속빈도곡선을 Fig. 3에 보였다.

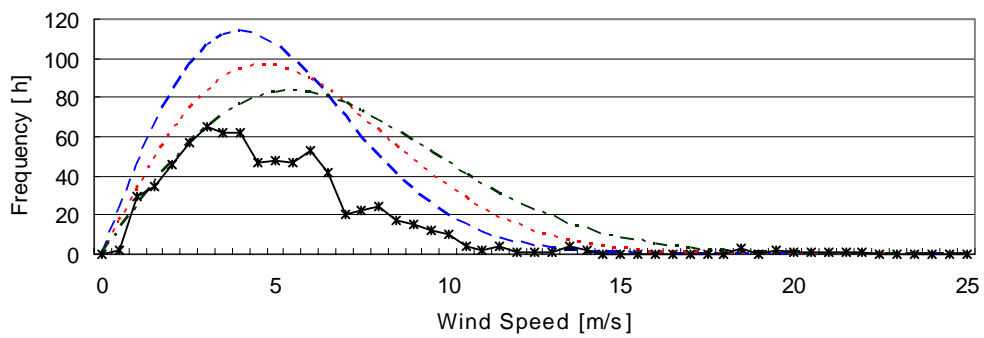
January



April



July



(continued)

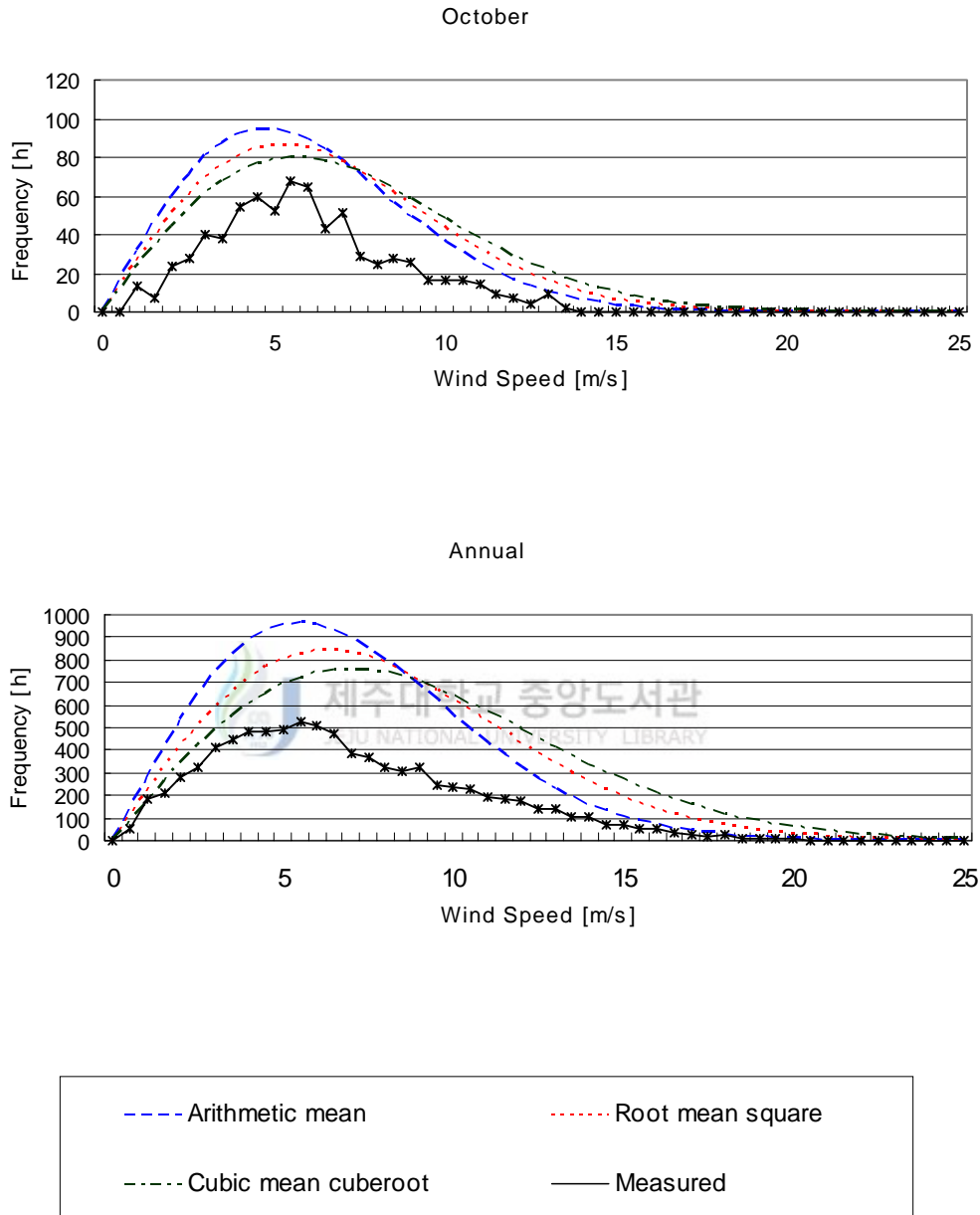
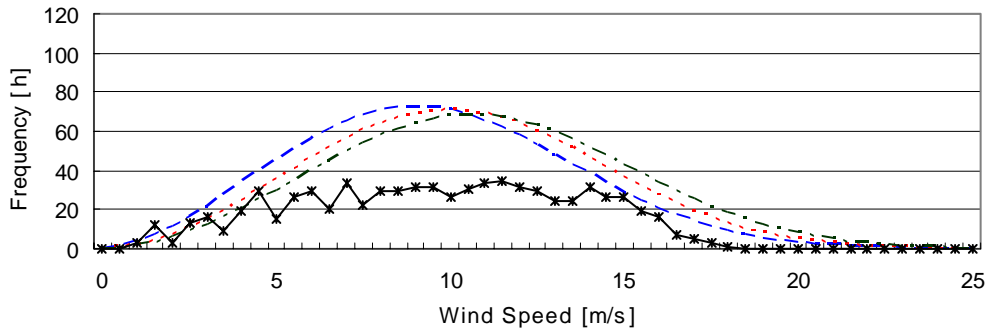
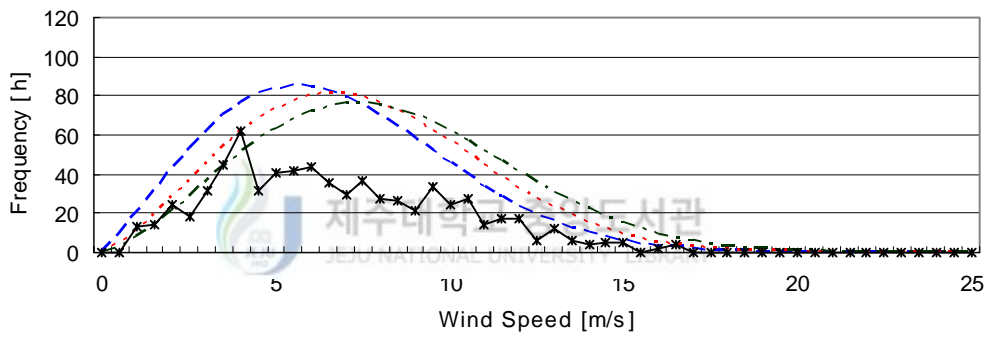


Fig. 2 Comparison of computed frequency by Rayleigh function and measured frequency.

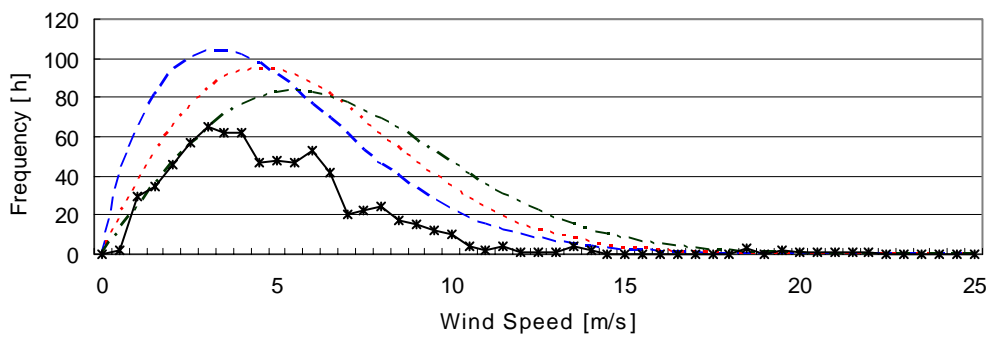
January



April



July



(continued)

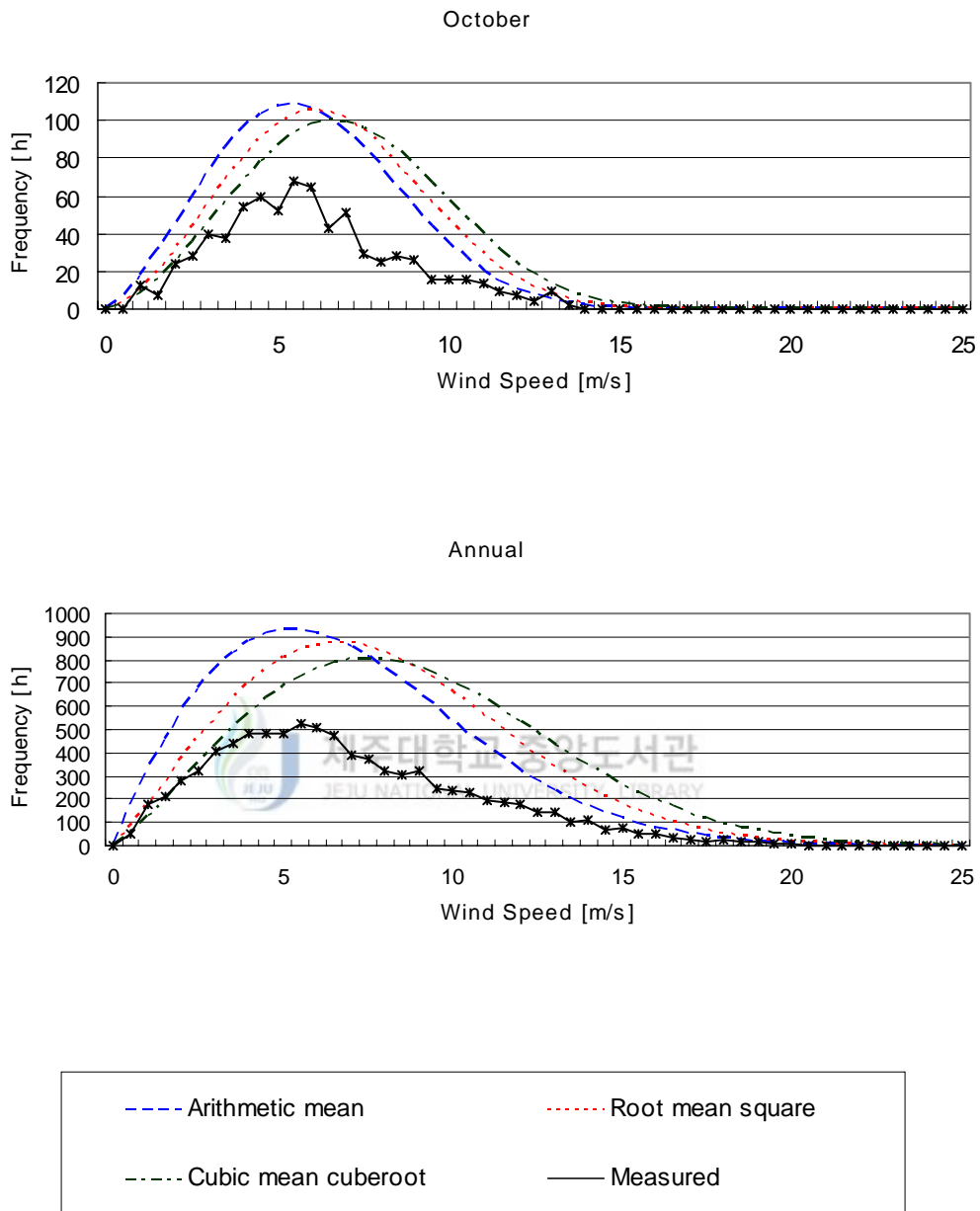


Fig. 3 Comparison of computed frequency by Weibull function and measured frequency.

Table 1에서 보듯이 평균풍속사이의 관계는 산술평균 <제곱평균 <세제곱평균이 됨을 알 수 있다.

Fig. 2의 Rayleigh 함수와 Fig. 3의 Weibull 함수에 의한 풍속빈도곡선에서 곡선이 평균치가 클수록 풍속이 큰 쪽으로 이동하고 최대빈도치가 작아진다.

또한, 세제곱 평균치에 의한 풍속빈도곡선은 Rayleigh 함수를 사용한 경우가 Weibull 함수를 사용한 경우보다 실측치에 더 접근하고 있다.

Fig. 2, 3과 Table 2를 비교하여 보면 확률밀도함수에 의한 풍속빈도곡선과 실측빈도곡선이 더 접근할수록 설비이용률도 더 커짐을 알 수 있다.

따라서, 풍속의 세제곱평균과 Rayleigh 함수를 사용한 경우가 실측빈도곡선에 더 접근하고 있으므로 풍력발전 시스템의 설치지점에서 실제의 설비이용률을 추정하는데 적합하다고 판단된다.



IV. 결 론

실측 풍속빈도곡선과 이를 모델링한 확률밀도함수의 평균풍속에 따른 풍속빈도곡선을 비교하고 설비이용률과의 관계를 분석하여 Weibull함수와 Rayleigh함수를 비교하였다. 이를 위하여 풍력자원측정지점의 측정 풍속자료로부터 산술, 제곱, 세제곱 평균풍속과 표준편차를 구하여 각 확률밀도함수의 계수들을 계산하고 Vestas 850[kW] 발전시스템의 출력-속도특성을 이용하여 설비이용률을 계산하여 분석하였다.

그 결과 Rayleigh함수에 의한 풍속빈도곡선이 Weibull함수에 의한 그것보다 실측빈도곡선과 더 접근하고 있으며 세제곱평균에 의한 빈도곡선이 실측빈도곡선과 접근도가 높았다. 또한 풍속빈도곡선의 접근도가 높을수록 설비이용률도 커짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

Jangamshetti, S. H. and V. G. Rau, 1999, Site Matching of Wind Turbine Generators, IEEE Trans, on EC, Vol. 14, No. 4, pp. 1537-1543.

Johnson, G. L. 1978, Economic Design of Wind Electric System, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97, No. 2, pp. 554-562.

Kawamoto, T., T. Sakakibara, and S. Enomoto, 1985, Power Output Analysis of Wind Turbines Based on Wind Velocity Statistics, JIEE, Pt. B, Vol. 105, No. 3, pp. 219-224.

Richardson, R. D. and G.M. McNerney, 1993, Wind Energy System, Proc. of the IEEE, Vol. 81, No. 3, pp. 378-389.

Salameh, Z. M. and I. Safari, 1992, Optimum Windmill-Site Matching, IEEE Trans, on EC, Vol. 7, No. 4, pp. 669-676.

허종철외, 2001, 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구용역(Ⅲ), 제주도.

감사의 말씀

희망과 기대를 가지고 배움의 문에 들어온지가 엇그제 같은데 벌써 2년 반이라는 시간이 지나 어느덧 갈무리를 하여야 할 시간입니다.

지나고보니 아쉽고 힘든 시간도 많았지만 주변의 격려와 도움으로 즐겁고 행복한 시간이었습니다.

이 논문이 완성되기까지 부족하고 모자란 저를 아낌없는 지도와 격려, 그리고 정성으로 지도하여 주신 좌종근 교수님께 깊은 감사를 드리며 대학원 입학이후 지금까지 많은 격려의 말씀과 용기를 주셨던 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님께 감사 드립니다.

바쁜 직장생활의 어려운 여건 속에서도 2년 반동안 서로 돕고 격려하며 버팀목이 되어주신 양완국, 고승우, 양문길 원생 그리고 연구과정에 있어서 옆에서 많은 도움을 주신 전기기기 연구실의 김도진, 김태한 학우 등 여러 선후배 학들에게도 감사드립니다.

오늘의 제가 있기까지 여러 가지 어려움 속에서도 끝없는 사랑과 희생을 주신 어머니와 장인, 장모님 그리고 저 멀리 하늘나라에서 보고계실 아버지에게 이 논문을 바칩니다.

끝으로, 부족한 저를 항상 곁에서 말없이 내조해준 사랑스런 아내와 직장과 학업에 바쁜 아빠를 잘 이해해준 귀엽고 예쁜 두 딸 명주, 민지와 함께 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2003년 6월

강택근 드림