

풍력발전기의 설비이용률 계산을 위한
확률밀도함수의 비교

*강택근, **허중철, ***좌종근

*제주대학교 산업대학원, **기계에너지생산공학부 *** 전자전기공학부

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

*Taeg-Geun Kang, **Jong-Chul Huh, ***Chong-Keun Jwa
Cheju National University

Abstract - The Weibull probability density function and the Rayleigh function are compared by analyzing the relations of the capacity factors which are compared the actual wind speed frequency curve with which are modelled 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 shows 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.

850[kW] 풍력발전기를 대상으로 설비이용률을 계산하였다. 실측한 풍속빈도곡선과 각 확률밀도함수의 평균풍속에 따른 풍속빈도곡선을 비교하여 설비이용률과의 관계를 분석하여 Weibull함수와 Rayleigh함수를 비교하였다.

2. 확률밀도함수와 설비이용률

2.1 확률밀도함수

바람은 높은 가변동력원으로 이 가변성을 특성화하는 가장 일반적인 것은 전력지속곡선이지만 주어진 풍력조사지점의 중요한 설계요구자료인 시동풍속과 정격풍속을 선택하는 것이 쉽지않다.

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

Weibull함수는 2개의 계수를 가지는 함수로

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

으로 주어지고, 여기서 k 는 정상계수이고 c 는 척도계수이며 v 는 실풍속이다.

Weibull함수를 사용한 평균풍속과 분산을 단순화한 식으로부터 구한 근사 정상계수와 척도계수는

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{ave}}\right)^{-1.086} \quad (2)$$

$$c = \frac{v_{ave}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3)$$

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

Rayleigh 함수는 1개의 계수를 가지는 함수로

$$f(v) = \frac{k}{c^2} e^{-\left(\frac{v^2}{2c^2}\right)} \quad (4)$$

으로 주어지고, 계수 c 는 다음과 같이 주어진다.

$$c = \frac{v_{ave}}{1.253} \quad (5)$$

또한 각 확률밀도함수의 계수를 구하기위한 평균풍속과 표준편차는

$$v_{ave} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N f_i v_i^n}{\sum_{i=1}^N f_i} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

1. 서 론

어떤 지점의 풍력포텐셜의 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 얻기위해 풍력지점에서의 최적풍차선정이 요구되고 있다.^[1]

이와 관련하여 풍력발전시스템의 에너지원가분석에 대한 미국전력연구소(Electric Power Research Institute)의 기술평가지침(TAG)에 의하면 평가요소로서 경제적 요소 이외에 풍황과 풍차와의 적합성을 평가하는 설비이용률도 포함되고 있다.^[2] Johnson^[3]은 풍력발전시스템의 경제적 설계에 산술평균을 사용하여 풍속빈도곡선을 연속함수로 모델링한 Weibull확률밀도함수로 설비이용률을 계산하여 평가하고, Kawamoto^[4] 등은 산술평균풍속에 의한 3승평균풍속으로 Weibull 함수를 사용하여 최적풍차선정에 대하여 검토하였다. Salameh와 Safari^[5]는 세계 평균풍속으로 Weibull 함수와 Rayleigh 함수로 설비이용률을 구하여 평가하였고, Jangamshetti와 Rau^[11]는 평균풍속으로 산술, 제곱, 그리고 세제곱 평균치를 사용하여 Weibull함수와 Rayleigh함수에 의하여 설비이용률을 계산하고 실측설비이용률과 비교하여 세계 평균풍속을 사용한 Weibull함수에 의한 결과가 실측결과에 더 접근함을 보이고 있다.

그러나 이들의 연구에서는 평균풍속의 종류에 따른 확률밀도함수와 설비이용률의 관계가 비교분석되어 있지 않다. 본 논문에서는 제주도 북제주군 구좌읍 검령리해안에서 실측한 1년간의 풍속자료^[6]를 가지고 산술, 제곱, 그리고 세계 평균풍속과 표준편차를 구하여 Weibull함수와 Rayleigh함수의 계수들을 결정하고 Vestas

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N f_i (v_i - v_{ave})^2}{\sum_{i=1}^N f_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

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

2.2. 설비이용률

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

$$CF = \frac{P_{ave}}{P_r} \quad (8)$$

평균출력전력은

$$P_{ave} = \int_0^{\infty} P_c(v) f(v) dv \quad (9)$$

로 주어지고, 여기서

$$P_c(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g v^3 \quad (10)$$

이다. 이 식에서 ρ 는 공기밀도, A 는 바람이 지나가는 풍차단면적, C_p 는 풍차의 동력계수, η_m 은 동력전달 장치의 효율, 그리고 η_g 는 발전기 효율이다.

또한

$$P_r = P_c(v_{ave}) \quad (11)$$

이므로 (9)식과 (11)식을 (8)식에 대입하면

$$CF = \frac{1}{v_{rat}^3} \int_{v_{ci}}^{v_{co}} v^3 f(v) dv + \int_{v_{co}}^{\infty} f(v) dv \quad (12)$$

로 설비이용률을 구할 수 있다. 이 식에서 $f(v)$ 는 (1)식의 확률밀도함수이고 v_{rat} , v_{ci} , v_{co} 는 각각 발전기 특성곡선에서의 정격풍속, 시동풍속, 그리고 중단풍속이다.

3. 분석결과

풍력발전시스템의 설치전 사전평가의 하나로 풍황과 풍차와의 적합성을 평가하는 설비이용률과 이 설비이용률을 계산하기 위한 Weibull 확률밀도함수와 Rayleigh 확률밀도함수를 비교한다.

이를 위하여 풍속자료로서 제주도 북제주군 구좌읍 김녕리 해안가에서 1년간 측정된 30[m] 지점에서의 풍속을 Vestas계의 출력 850[kW] 풍력발전기의 허브높이 50[m]로 외삽한 자료를 사용하였다. 이 발전기의 출력-풍속특성에서부터 시동풍속 (v_{ci})은 15[m/s], 그리고 중단풍속은 25[m/s]로 하여 설비이용률을 계산하였다.

각 확률밀도함수의 계수들을 결정하기 위하여 평균풍속과 표준편차를 (6)식과 (7)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
표 1. 김녕지역의 월 및 년평균 풍속과 표준편차

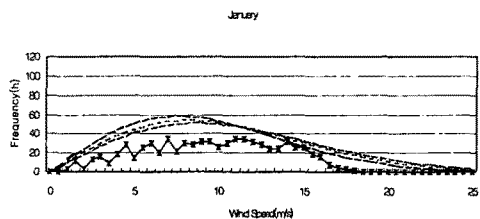
Month	Arithmetic		Root		Cubic	
	v	σ	v	σ	v	σ
Jan	9.5913	3.9285	10.3647	4.0039	10.9660	4.1620
Feb	9.2880	3.9658	10.0993	4.0479	10.8252	4.2532
Mar	8.1229	4.2373	9.1617	4.3628	10.0994	4.6756
Apr	6.7034	3.3424	7.4905	3.4339	8.1707	3.6503
May	5.4354	2.4351	5.9560	2.4901	6.3981	2.6185
Jun	5.2159	2.7769	5.9091	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 (12)식에 의하여 계산한 월 및 년 설비이용률을 Table 2에 보였다.

Table 2. Computed Monthly and Annual Capacity Factors
표 2. 계산된 월 및 년 설비이용률

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



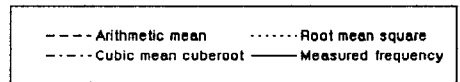
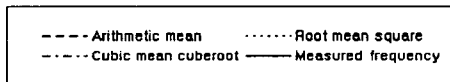
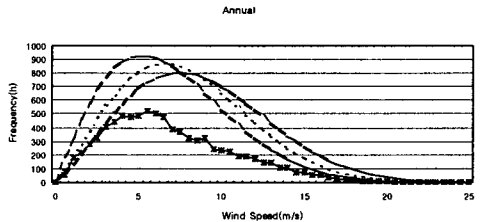
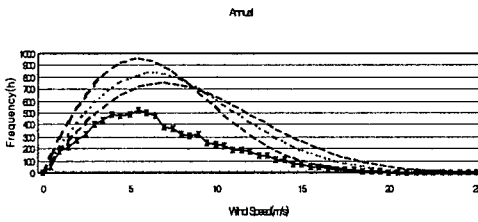
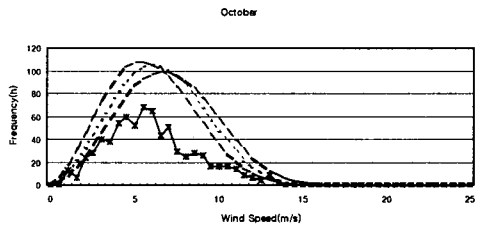
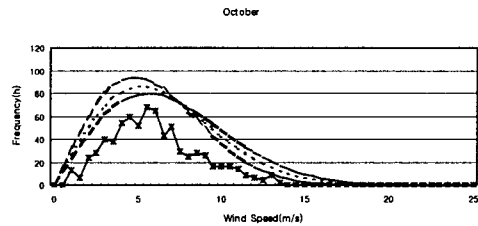
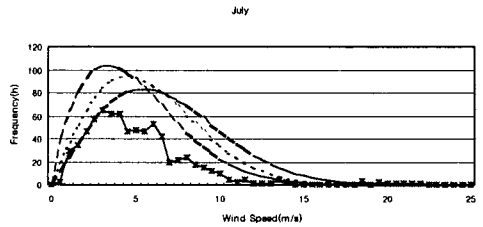
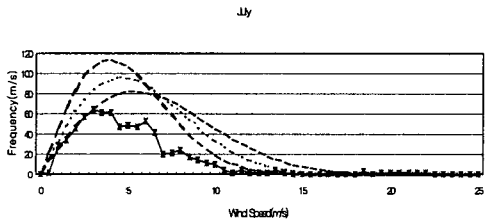
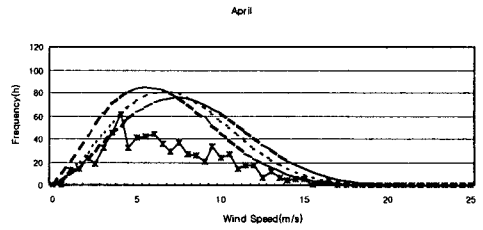
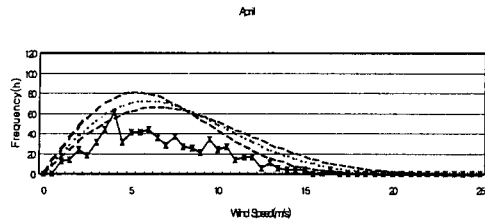


Fig. 1. Comparison of Computed Frequency by Rayleigh Function and Measured Frequency.

그림 1. Rayleigh 함수에 의해 계산된 빈도와 측정빈도와의 비교

Fig. 2. Comparison of Computed Frequency by Weibull Function and Measured Frequency.

그림 2. Weibull 함수에 의해 계산된 빈도와 측정빈도와의 비교

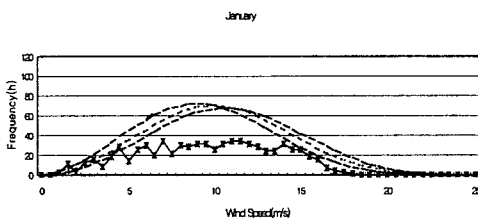


Table 1에서 보듯이 평균풍속사이의 관계는 산술평균 <제곱평균 <세제곱평균이 됨을 알 수 있다.

Fig 1의 Rayleigh, Fig 2의 Weibull 함수에 의한 풍속 빈도곡선에서 곡선이 평균치가 클수록 풍속이 큰 쪽으로 이동하고 최대빈도치가 작아진다.

Fig. 1의 Rayleigh 함수를 사용하고 세계급 평균치에 의한 풍속빈도곡선이 실측치에 더 접근하고 있다.

Fig. 1, 2와 Table 2를 비교하여 보면 확률밀도함수에 의한 풍속빈도곡선과 실측빈도곡선이 더 접근할수록 설비이용률도 더 커짐을 알 수 있다.

3. 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)

- [1] S. H. Jangamshetti and V. G. Rau, Site matching of wind Turbine Generators, IEEE Trans, on EC, Vol. 14, No. 4, 1999.
- [2] R. D. Richardson and G.M. McNerney, Wind energy System, Proc. of the IEEE, Vol. 81, No. 3, 1993.
- [3] G. L. Johnson, Economic design of wind electric system, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97, No. 2, 1978.
- [4] T. Kawamoto, T. Sakakibara, and S. Enomoto, Power output analysis of wind turbines based on wind velocity statistics, JIEE, Pt. B, Vol. 105, No. 3, 1985.
- [5] Z. M. Salameh and I. Safari, Optimum windmill-site matching, IEEE Trans, on EC, Vol. 7, No. 4, 1992.
- [6] 허종철외, 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구용역(Ⅲ), 제주도, 2001.