

## 혼합확률분포를 이용한 복잡지형의 풍력자원 평가

송호성\*, 권순덕\*\*

\*전북대학교 대학원 토목공학과 박사과정(ddeeuuxx@jbnu.ac.kr),  
\*\*전북대학교 토목공학과 교수(sdkwon@jbnu.ac.kr)

### Wind energy assessment at complex terrain using mixture probability distribution

Song, Ho-Sung\*, Kwon, Soon-Duck\*\*

\*Dept. of Civil Engineering, Graduate School, Chonbuk National University(ddeeuuxx@jbnu.ac.kr),  
\*\*Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University(sdkwon@jbnu.ac.kr)

#### Abstract

This paper presents a method for assessing the wind energy potential at complex terrain using probability distribution. And the proper probability models of the parameters estimating the wind energy are presented. Finally a mixture-Weibull determined by numerical methods procedure are proposed to assess the probability distribution of the energy potential at a site. The developed method is applied to the Kwanjungchun Bridge and compared with wind records which the neighboring weather station.

Keywords : Wind energy(풍력에너지), Wind resource assessments(풍력에너지평가), Probability density function(확률밀도함수), Mixture-Weibull distribution(혼합와이블분포), Estimations of parameters(매개변수 추정)

#### 기 호 설 명

$A$  : Rotor swept area [ $m^2$ ]  
 $C$  : Scale parameter [ $m/s$ ]  
 $E$  : Energy production [ $Wh$ ]  
 $f$  : Probability density function  
 $k$  : Shape parameter  
 $m_1'$  : Simple mean

$m_r'$  : The set of statistical moments with respect to the origin of the sample  
 $N$  : Number of data  
 $P$  : Wind power  
 $P_w$  : Power performance of wind turbine [ $W$ ]  
 $s^2$  : Variance

submit date : 2012. 10. 30, judgment date : 2012. 11. 10, publication decide date : 2013. 4. 24  
communication author : Kwon, Soon-Duck(sdkwon@jbnu.ac.kr)

- $T$  : Sustainment time [hour]
- $V$  : Wind speed [m/s]
- $\Gamma$  : Gamma function
- $\rho$  : Air density [kg/cm<sup>3</sup>]
- $\omega$  : Mixing parameter

## 1. 서 론

풍력에너지는 풍속의 세제곱에 비례하므로 풍력에너지 예측 시, 풍속은 가장 중요한 요소이다. 풍력발전기의 연간 에너지생산량은 풍속 확률밀도함수에 대하여 풍력발전기로부터 측정된 출력곡선을 적용하여 예측할 수 있다. 이러한 이유로 특정지역에 대한 풍속의 확률분포를 결정하는 것은 매우 중요하며, 풍속 등의 기상자료의 수집 및 분석은 풍력발전단지 of 성패를 좌우하는 주요한 인자 중의 하나이다.

현재 풍력발전의 연간에너지생산량 추정에 사용되는 풍속의 확률분포로써 IEC-61400에서 규정하고 있는 형상계수가 2인 Rayleigh 분포를 사용하거나[8], 2개의 매개변수를 갖는 Weibull분포를 일반적으로 사용하고 있다. 대부분의 지역에서는 이러한 방법으로 풍속의 확률분포를 작성하는데 큰 어려움이 없다. 그러나 바람은 다양한 풍속 및 풍향으로 발생하고 주변 지형의 영향을 크게 받는다. 특히 바람의 발생원인이 2개 이상 존재하는 지형에서는 1개의 피크를 갖는 일반적인 형태의 확률분포를 사용할 경우 풍력자원을 과대 혹은 과소평가 할 소지가 있다.

본 연구에서는 산지와 같은 복잡한 지형에서 단기간 관측한 현장풍속을 이용하여 합리적인 풍속의 확률분포를 추정하고, 이를 바탕으로 풍력에너지를 평가할 수 있는 방법을 연구하였다. 연구에 대한 예로서 강원도의 3개 지역에 대한 풍속데이터를 분석하였으며, 이 중 강원도 광정천교의 경우 실제 설치한 소형 풍력발전기에서 생산된 발전량과의 관계를 비교하였다.

## 2. 풍속의 확률밀도함수

### 2.1 풍력 에너지

바람에 의한 풍력에너지를 식으로 표현하면 다음 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

위 식에서 보듯이, 풍력에너지는 풍속의 세제곱에 비례하기 때문에 풍력에너지 평가에서 풍속은 가장 중요한 요소이며, 풍력발전기로부터 생산되는 연간에너지생산량은 풍속에 대한 확률밀도함수와 측정된 풍력발전기의 출력곡선의 조합으로 다음 식 (2)와 같이 예측할 수 있다.

$$\frac{E}{A} = \frac{T}{A} \int_0^{\infty} P_w(V) f(V) dV \quad (2)$$

### 2.2 풍속의 확률밀도함수

#### (1) Weibull 분포

일반적으로 풍속의 발생빈도를 표현하기 위한 확률분포에는 2개의 매개변수를 이용한 Weibull분포(2-parameters Weibull distribution)가 사용된다.[5]

Weibull분포는 Gamma 분포의 특별한 경우로 확률밀도함수는 다음의 식 (3)과 같다.

$$f_v(V) = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right\}, \text{ for } V > 0$$

$$f_v(V) = 0, \text{ for } V \leq 0 \quad (3)$$

그러나 이러한 일반적인 Weibull분포만으로는 모든 형태의 풍속발생빈도를 설명할 수 없으며, 지형적인 특성이나 현장의 특수한 상황으로 인하여 서로 다른 2개 이상의 풍속특성을 갖는 일부 특정지역에서는 확률밀도함수를 결정하는데 한계를 보인다.

Jaramillo and Borja(2004)[4], Carta and Ramirez(2007)[3] 등은 두 가지의 구성 요소가 혼합된 Weibull 분포(two-components Mixture-Weibull distribution)를 사용하여 풍속의 확률밀도함수를 결정하였다.

(2) Two components mixture-Weibull 분포

Mixture-Weibull분포는 서로 다른 Weibull 분포의 조합으로 이루어진 선형의 확률밀도 함수이다. 만약 풍속  $V_i(i=1, 2)$ 가 각각 서로 다른 2개의 매개변수를 갖는 Weibull분포  $f_i(v_i, C_i, k_i)$ 에 의해서 독립적이라고 한다면, 전체 풍속  $V$ 의 확률분포는 혼합매개변수  $\omega_i$  (여기서,  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ )를 도입하여 2개의 구성요소가 혼합된 Weibull분포(two component mixture-Weibull distribution)로 나타낼 수 있다.

이러한 풍속의 확률밀도함수(Probability density function)는 풍속  $v$ 에 대해 5개의 매개변수를 갖는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 &ff(C_1, k_1, C_2, k_2, \omega) \\
 &= \omega f(C_1, k_1) + (1 - \omega)f(C_2, k_2) \\
 &= \omega \left\{ \frac{k_1}{C_1} \left( \frac{v}{C_1} \right)^{k_1-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{C_1} \right)^{k_1} \right] \right\} \\
 &\quad + (1 - \omega) \left\{ \frac{k_2}{C_2} \left( \frac{v}{C_2} \right)^{k_2-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{C_2} \right)^{k_2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서,

$v > 0$ 일 때,  $C_1, k_1, C_2, k_2 > 0, 0 \leq \omega \leq 1,$

$v \leq 0$ 일 때,  $ff(C_1, k_1, C_2, k_2, \omega) = 0$

또한 누적분포함수(Cumulative distribution function)는 다음 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &FF(C_1, k_1, C_2, k_2, \omega) \\
 &= \omega F(C_1, k_1) + (1 - \omega)F(C_2, k_2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \omega \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v}{C_1} \right)^{k_1} \right] \right\} \\
 &\quad + (1 - \omega) \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v}{C_2} \right)^{k_2} \right] \right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

(3) 혼합확률분포의 매개변수 추정방법

앞절의 식 (4), (5)의  $C, k$  및  $\omega$ 는 Weibull 분포와 Mixture-Weibull분포를 결정하기 위한 척도, 형상 및 혼합 매개변수이며, 주어진 풍속데이터로부터 모멘트법, 최우도법, 최소자승법 등을 이용하여 추정할 수 있다.[3]

1) 모멘트법 (Method of moments)

모멘트법에 의한 Mixture-Weibull확률분포의 매개변수  $C_1, k_1, C_2, k_2$  및  $\omega$ 를 추정하기 위해서는 다음 식 (6)을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned}
 m_r' &= \frac{\sum_{i=1}^n v_i^r}{n} \rightarrow \frac{\sum_{i=1}^n v_i^r}{n} \\
 &= \omega C_1^r \Gamma \left( 1 + \frac{r}{k_1} \right) + (1 - \omega) C_2^r \Gamma \left( 1 + \frac{r}{k_2} \right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서,

$r = 1, \dots, 5, C_1, k_1, C_2, k_2 > 0, 0 \leq \omega \leq 1$

비선형방정식인 식 (6)은 다음 식 (7)과 같은 초기값을 사용한 quasi-Newton algorithm 등의 수치적인 방법에 의해서 계산할 수 있다[3].

$$\begin{aligned}
 k_1 = k_2 &= \left( \frac{\sqrt{s^2}}{m_1'} \right)^{-1.086} \\
 C_1 = C_2 &= m_1' \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k_1} \right) \right]^{-1} \\
 \omega &= 0.25, 0.5, 0.75
 \end{aligned} \tag{7}$$

2) 최우도법 (Method of maximum likelihood)

최우도법에 의한 매개변수 추정은 뉴턴-

랩슨법(Newton-Raphson method), 평점법(Scoring method), 기대치최대화 알고리즘(expectation-maximization algorithm) 등의 수치적인 방법을 이용하여 다음 식 (8)과 같이 계산되어진다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximise } \log\text{-likelihood}(C_1, k_1, C_2, k_2, \omega) \\ & = \ln \prod_{i=1}^n \left\{ \omega \left[ \frac{k_1}{C_1} \left( \frac{v_i}{C_1} \right)^{k_1-1} \exp\left(-\left(\frac{v_i}{C_1}\right)^{k_1}\right) \right] \right. \\ & \quad \left. + (1-\omega) \left[ \frac{k_2}{C_2} \left( \frac{v_i}{C_2} \right)^{k_2-1} \exp\left(-\left(\frac{v_i}{C_2}\right)^{k_2}\right) \right] \right\} \\ & = \sum_{i=1}^n \ln \left\{ \omega \left[ \frac{k_1}{C_1} \left( \frac{v_i}{C_1} \right)^{k_1-1} \exp\left(-\left(\frac{v_i}{C_1}\right)^{k_1}\right) \right] \right. \\ & \quad \left. + (1-\omega) \left[ \frac{k_2}{C_2} \left( \frac{v_i}{C_2} \right)^{k_2-1} \exp\left(-\left(\frac{v_i}{C_2}\right)^{k_2}\right) \right] \right\} \end{aligned} \tag{8}$$

3) 최소자승법 (Method of least square)

최소자승법을 이용한 미지의 매개변수를 추정에는 다음 식 (9)와 같이, 상대누적도수 값  $P$ 와 아래의 일차부등식 제약조건을 만족하는 데이터의 편차를 최소화함으로써 수치적인 방법에 의하여 계산할 수 있다.

$$\text{Min } S = \sum_{i=1}^N \left\{ P_i - \omega \left[ 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_{d,i}}{C_1}\right)^{k_1}\right] \right] \right\}^2 + \left\{ -(1-\omega) \left[ 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_{d,i}}{C_2}\right)^{k_2}\right] \right] \right\}^2 \tag{9}$$

여기서,  $C_1, k_1, C_2, k_2 > 0, 0 \leq \omega \leq 1$

본 연구에서는 Weibull분포와 Mixture-Weibull 분포의 매개변수 추정에 있어, 풍속의 히스토그램과 가장 유사한 형태를 보이는 최우도법(Maximum likelihood method)을 사용하였다.

3. 대상 지역의 풍속

3.1 풍속 자료

평균풍속에 대한 확률밀도함수를 이용한

풍력에너지 추정의 예제로 강원도 양양군에 위치한 광정천교에서 2012년 1월 20일부터 2012년 5월 30일까지 약 4개월 동안 측정된 풍속을 사용하였다. 광정천교에는 고가교량에서의 풍력에너지 수확에 대한 연구목적으로 교량 하부에 소형풍력발전기와 기상관측을 위한 센서를 설치하였으며, 기상관측센서 중 풍향/풍속계는 교량으로부터 상부 5m 높이와 교량하부의 풍력발전기의 허브위치인 지상고도 43m 높이에 각각 설치하였다. 설치된 풍력발전기는 Southwest의 소형풍력발전기 Skystream 3.7(Fig. 1)이며, 그 제원은 다음 Table. 1에 정리되어 있다.



Fig. 1 Installed wind turbine, Skystream 3.7

Table. 1 Specification of installed wind turbine

Product name	Skystream 3.7
Maker	Southwest (USA)
Type	Horizontal axis
Rated power	2.4 (kW)
Cut-in wind speed	3.5 (m/s)
Rated wind speed	13 (m/s)
Diameter of blade	3.72 (m)
Weight (except tower)	77 (kg)
Installed date at site	2011.11.15

양양과 강릉의 풍속데이터는 기상청에서 제공하는 2011년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지 매10분간격으로 측정 및 기록된 데이터를 이용하였으며, 데이터 회수율은 2개 지점 모두 99%이상이다. Fig. 2와 Table. 2에서

각 지점의 위치와 정보를 나타내었다. 세 지역 모두 북동쪽에 해안선과 남서쪽의 산악지형의 계곡 사이에 위치해 있어, 대표적인 해륙풍이 발생할 것으로 예상되는 지역이다.



Fig. 2. Geographical position and topographic condition

Table. 2 Information of sites

Site name (Abbreviation)	Period of measurement	Height of sensors (m)
광정천교 (KJC)	2012.01.20~05.30	43
양양AWS (YY)	2011.01.01~12.31	10
강릉기상관측소 (GR)	2011.01.01~12.31	17.9

### 3.2 광정천교 풍속 측정

광정천교에서는 기상관측센서로써 케이웨더의 자동기상관측시스템 현장에서 사용하고 있는 웰비안시스템의 풍향/풍속계(WW-100)를 사용하고, 동일회사의 데이터로거(KL400)를 IEC-61400에서 규정하는 최소 1Hz의 샘플링속도를 갖도록 수정하여 사용하였다. 풍력발전기로부터 생산되는 풍력에너지의 정량적인 측정을 위하여, RS-485통신을 통해 컴퓨터와의 직접연결이나 데이터로거와 통신이 가능한 LS산전의 디지털전력량계 GIMAC-i를 설치하였다. 이 전력량계를 통해 소형풍력발전기로부터 생산되는 전기의 전압, 전류, 전력, 누적전력량을 측정한다.

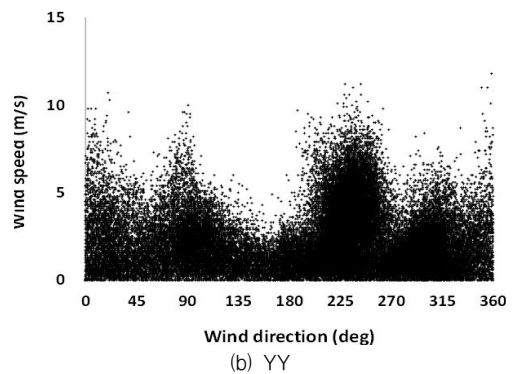
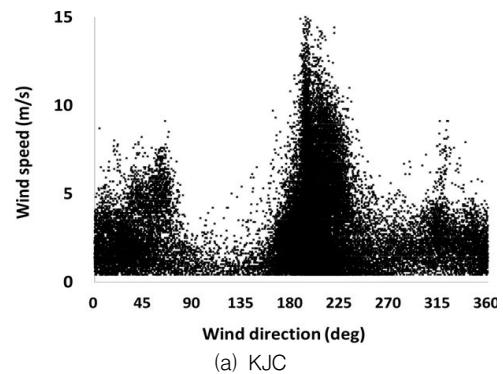
기상관측센서 및 전력량계로부터의 데이터는 평균값, 최대값, 최소값 및 표준편차의 4가

지로 분류하여 매10분마다 데이터로거에 기록되며, CDMA모뎀을 이용한 무선통신을 통해 광정천교 현장에서 수백km 떨어진 원격지에서 데이터를 수집하고 있다. 본 연구에서는 풍력발전기 허브위치에서 측정된 풍향/풍속데이터를 사용하였다.

## 4. 대상 지역의 풍향 분석

### 4.1 방위각별 풍향분석

다음의 Fig. 3은 관측기간동안 대상지역에서 측정된 각 풍향에 대한 풍속을 나타낸 것이며, Table. 3과 Fig. 4는 풍향빈도와 평균풍속을 22.5°씩의 16방위로 나누어 정리한 것이다. 지점별로 다소간의 차이는 있지만, 남서쪽의 계곡에서 불어오는 바람의 영향을 가장 많이 받고 있으며, 평균풍속 역시 상대적으로 높은 것으로 나타났다.



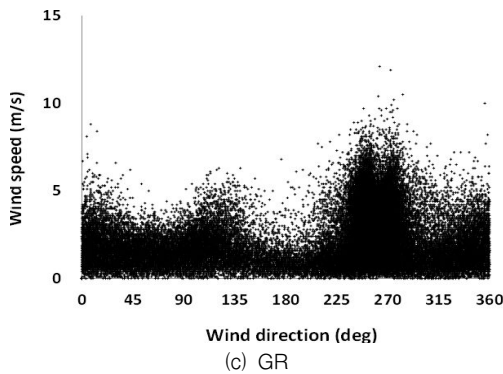


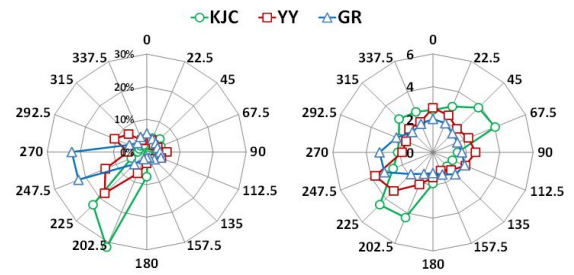
Fig. 3 10 minute average wind speed according to the wind direction of each site

Table. 3 Wind direction frequency and mean wind speed of each site according to the azimuth

Azimuth (deg)	Frequency (%)			Mean Wind Speed (m/s)		
	KJC	YY	GR	KJC	YY	GR
0	4	3.5	5.7	2.59	2.71	2.04
22.5	4.6	3.9	4.3	3.02	2.44	1.92
45	5.6	3	3.8	3.85	2.03	1.65
67.5	4.6	3.6	3.5	4.03	2.30	1.58
90	1.4	6.1	4	1.47	2.55	1.73
112.5	0.8	4.8	4.6	1.26	2.11	2.05
135	0.7	3	3.2	1.19	1.53	1.89
157.5	1.1	2.3	1.9	1.23	1.20	1.46
180	7.6	3.5	1.7	1.90	1.53	1.26
202.5	31.6	7.1	2.4	4.30	2.12	1.41
225	22.9	17.9	5.3	4.51	3.32	1.87
247.5	5	13.5	22.3	2.58	3.75	3.15
270	2.7	5.7	22.6	2.11	1.85	3.20
292.5	2.4	10.5	5.7	2.21	1.74	2.37
315	2.6	7.7	3.9	2.87	2.02	1.75
337.5	2.3	3.9	5.0	2.67	2.0	1.88
Total	100	100	100	3.61	2.49	2.45

풍향빈도와 평균풍속으로 볼 때, 세 지역의 주풍향은 방위각 202.5~270°사이의 남서풍이며, 특히 광정천교의 경우 방위각 202.5~225°에서 풍향빈도의 50% 이상을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 광정천교는 평균풍속이 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났는데, 이는 측정위치의 지면으로부터의 고도가 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 것과, 측정기간이 양양과 강릉은 1년 동

안인데 비해 광정천교는 겨울에서 봄사이의 비교적 짧은 기간으로 인한 계절적 영향으로 판단된다.



(a) Wind direction frequency (b) Mean wind speed

Fig. 4 Wind direction frequency and mean wind speed of each site according to the azimuth

#### 4.2 시간별 풍향분석

다음의 Fig. 5에서는 풍속 및 풍향 분포를 하루 중 시간별로 보여주고 있는데, 이 분포를 살펴보면 세 지점에서의 바람의 특성을 낮과 밤으로 구분할 수 있다. 밤시간대에는 방위각 200~240° 사이의 남서쪽으로 풍향이 집중되어 있으며, 낮시간대의 평균풍속이 밤시간대보다 상대적으로 높다. 이는 해안과 계곡사이의 지형적인 특성에 의한 것으로 볼 수 있다.

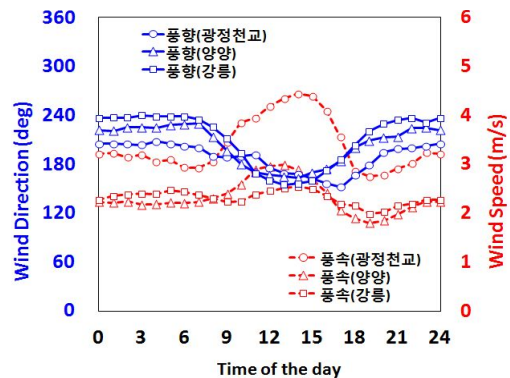


Fig. 5 Mean wind direction and mean wind speed of each site according to the time of the day

#### 4.3 대상지역의 풍속에 대한 확률밀도함수

다음의 Fig. 6은 양양AWS와 강릉기상관

측소 및 광정천교에서의 풍속에 대한 히스토그램과 확률밀도함수이다. 지점별로 살펴보면 양양AWS와 강릉기상관측소의 확률밀도함수는 히스토그램과 비교하였을 때, Weibull 분포와 Mixture-Weibull 분포가 비슷하게 표현되는 것으로 나타났다. 그러나 광정천교에서의 풍속분포는 일반적인 Weibull 분포를 사용한 확률밀도함수의 경우, 풍속 0.8~2.5m/s 구간에서는 히스토그램보다 과소하게 표현되고 있으며, 풍속 2.5~5.8m/s 구간에서는 히스토그램보다 과대하게 표현되는 것으로 나타났다. 그런데, 동일한 풍속에 대하여 Mixture-Weibull 분포를 사용한 확률밀도함수는 히스토그램과 거의 일치함을 볼 수 있다.(Fig. 6(a))

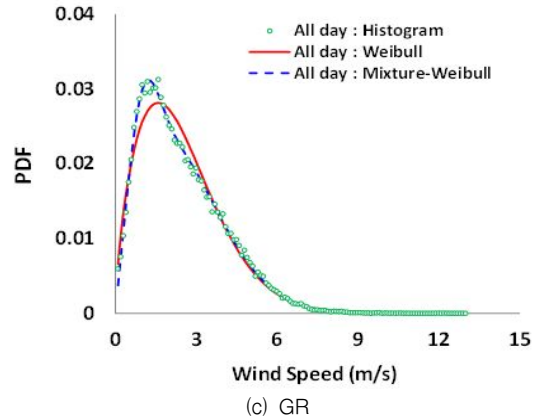
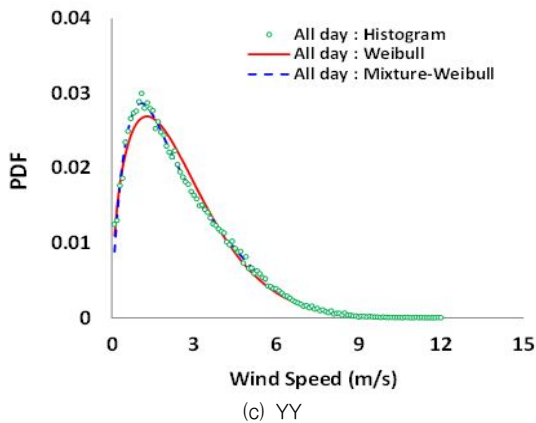
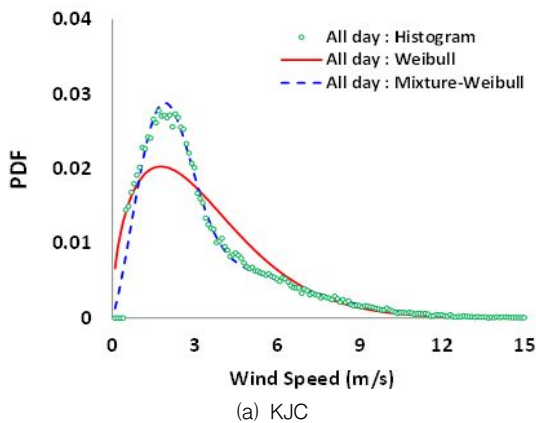
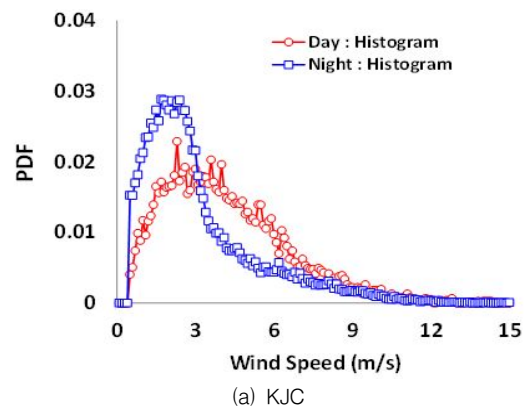


Fig. 6 Probability density function of wind speed

이와 같은 풍속에 대한 확률밀도함수의 원인은 다음 Fig. 7에서 풍속을 낮과 밤시간대별 구분하여 각각 히스토그램한 결과로부터 찾아볼 수 있다. 양양과 강릉의 경우 풍속 6m/s 이하의 구간에서 풍속의 발생확률이 낮과 밤시간대에서 약간의 차이를 보이고 있는 반면, 광정천교의 경우(Fig.7(a)) 전혀 다른 형태를 보이고 있다. Fig. 6(a)와 비교하여 보면, 낮시간대에는 Weibull 분포의 형태, 밤시간대에는 Mixture-Weibull 분포의 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 낮과 밤의 서로 다른 풍속의 크기와 분포형상이 전체의 확률밀도함수를 결정하는데 있어서 영향을 미치는 것으로 판단된다.



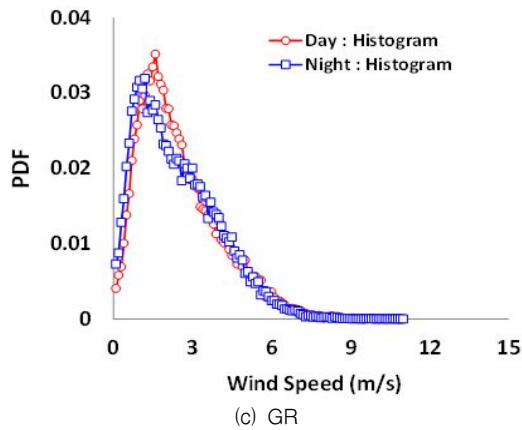
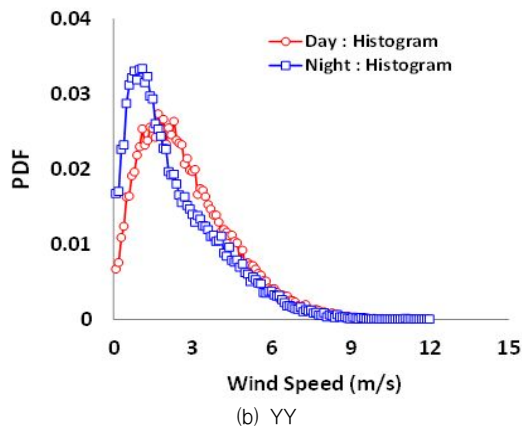


Fig. 7 Histogram of wind speed at each site for day(08~18) and night(18~08)

#### 4.4 광정천교에서의 풍력에너지 예측값 비교

본 연구에서는 2012년 1월 20부터 2012년 5월 30일까지, 약 132일간 관측된 풍속데이터를 이용하여 평균풍속의 확률밀도함수에 따른 풍력에너지 예측을 실시하였으며, 확률밀도함수에는 Weibull분포와 Mixture-Weibull 분포를 사용하였다.

풍력에너지 예측을 위하여 Southwest사의 소형풍력발전기 Skystream 3.7의 출력곡선(Fig. 8)을 사용하였으며, 관측된 풍속의 히스토그램과 풍속의 확률밀도함수(Fig. 9(a)) 및 그에 따른 풍력에너지 예측량(Fig. 9(b))을 도시하였다.

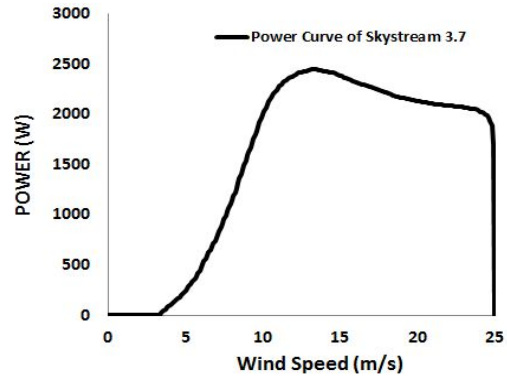


Fig. 8 Power performance curve of wind turbine Skystream3.7

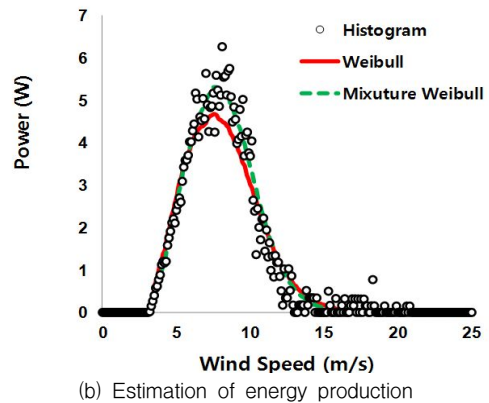
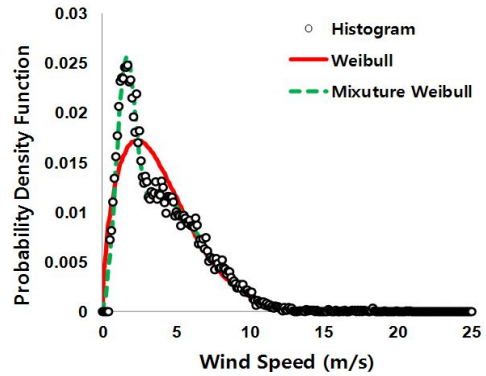


Fig. 9 Estimation of energy production at KJC

다음의 Table. 4에서는 식(5)~(6)에 의한 오차를 비교 정리한 것이다. 그 결과를 살펴



보면 광정천교의 풍력에너지 예측에 있어서 낮시간대에는 확률밀도함수에 관계없이 큰 차이가 없지만, 밤시간대의 경우, Weibull분포를 사용한 확률밀도함수보다 Mixture-Weibull분포를 사용한 확률밀도함수를 적용하는 것이 그 오차를 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

$$\text{Bias error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_T - E_P) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Root mean square error} \\ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_T - E_P)^2} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서,  $E_T$ 는 히스토그램을 이용한 전력량 추정치이며,  $E_P$ 는 확률밀도함수를 이용한 전력량 추정치이다.

Table. 4 Comparison of error

Site	Time of a day	Estimation Method	Error	
			Bias	RMS
KJC	Day time (08-18)	Weibull	-0.0067	0.2677
		Mixture-Weibull	0.0080	0.2548
	Night time (18-08)	Weibull	0.1041	0.3352
		Mixture-Weibull	-0.0293	0.2307
GR	Day time (08-18)	Weibull	0.0402	0.2261
		Mixture-Weibull	-0.0309	0.1923
	Night time (18-08)	Weibull	-0.0051	0.0438
		Mixture-Weibull	-0.0006	0.0249
YY	Day time (08-18)	Weibull	0.0046	0.0455
		Mixture-Weibull	0.0006	0.0387
	Night time (18-08)	Weibull	0.0027	0.0644
		Mixture-Weibull	-0.0007	0.0392

다음의 Table. 5에서 풍속의 확률밀도함수에 의한 에너지생산량 예측값과 실제 풍력발

전기로부터 측정된 에너지생산량을 비교하였다. 풍속의 확률밀도함수가 Mixture-Weibull 분포 형태를 나타낸 밤시간대의 예측값이 측정된 에너지생산량과 매우 유사함을 볼 수 있다.

Table. 5 Comparison of energy production

Time of a day	Energy production (kWh)		
	Estimation		Measurement
Day time (08-18)	Histogram	364.83	333.28
	Weibull	366.63	
	Mixture-Weibull	366.97	
Night time (18-08)	Histogram	377.31	382.80
	Weibull	339.15	
	Mixture-Weibull	388.34	

## 5. 결 론

본 연구에서는 단기간 관측한 현장풍속을 이용하여 풍력에너지를 평가하기 위한 합리적인 풍속의 확률밀도함수의 추정을 위한 방법으로 일반적인 Weibull분포와 다른 Weibull 분포의 선형조합으로 이루어진 Mixture-Weibull 분포를 비교하였다. 연구에 대한 예로서 강원도의 3개 지역에 대한 풍속데이터를 분석하였으며, 이 중 강원도 광정천교의 경우 실제 설치한 소형풍력발전기에서 생산된 발전량과의 관계를 비교하였다.

그 결과를 보면, 양양과 강릉 및 광정천교는 그 지리적 위치와 주변의 지형 조건이 거의 비슷하여 주풍향이 모두 남서쪽으로 치우쳐 있는 양상을 보이고 있다. 그러나 풍속의 분포 및 확률밀도함수가 광정천교의 경우 다른 두 지점과 비교하여 차이를 나타내고 있는데, 이는 광정천교의 풍속데이터가 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 고도에서 측정되고 있는 특수한 지형적 조건에 따른 것으로 판단된다. 그리고 광정천교와 같은 복합 지역의

풍력에너지 추정을 위해서는 일반적인 Weibull 분포보다 Mixture-Weibull 분포가 더 잘 맞는 것으로 나타났다. 향후 연구과제로 확률밀도 함수의 적용에 있어 다양한 지역과 조건에 따른 비교를 통한 더욱 상세한 연구와 검증이 필요하다.

### 후 기

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### References

1. Ahmad Mahir Razali and Ali A. Salih, Combining Two Weibull Distributions Using a Mixing Parameter, European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.31 No.2(2009) pp296-305.
2. Chang T.J. et. al., Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan, Renewable Energy, 28(2003) pp851-871.
3. J.A. Carta and P. Ramirez, Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions, Renewable Energy, 32(2007) pp518-531.
4. Jaramillo OA, Borja MA. Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. Renewable Energy 29 (2004) pp1613 - 1630.
5. Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L., "Wind Energy Explained. Theory, Design and Application", Wiley, 2002.
6. Simliu, E. and Miyata, T., "Design of Buildings and Bridges for Wind", Wiley. 2006.
7. Soon-Duck Kwon, Uncertainty analysis of wind energy potential assessment, Applied Energy. 87(2010) pp856-865.
8. IEC, Wind turbines. Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, IEC 61400-12-1, International Electrotechnical Commission(2005).
9. 정의현 외, 복잡지형 형상에 따른 풍력자원 보정에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집 Vol 29, No 6,(2009) pp62-68.