단기관측에 의한 월령 연안지역 풍력에너지 잠재량 평가

*정 태윤[1], **임 희창[2]

Assessment of Wind Energy Potentiality in Wolryong using Short-term Observation

*Tae-yoon Jeong, **Hee-chang Lim

Key words : Wind energy(풍자원), Wind profile(풍속 분포), Roughness length(표면조도), Logarithmic profile(대수분포), Weibull distribution(와이블 분포도), Rayleigh distribution(레일리 분포도), Atmospheric stability(대기안정성)

Abstract : Wind energy resources are recently considered as an important power generation alternative in the future. The fact that the investment of wind turbine installation continues to increase has motivated a need to develop more widely applicable methodologies for evaluating the actual benefits of adding wind turbines to conventional generating systems. This study is aiming to estimate the future wind resources with various estimation methods. The wind power is calculated at the hub height 75m of 800KW and 1,500KW wind turbines in Wolryong site, Jeju island, South Korea. Three equations - logarithmic, profile, and power law methods are applied for the accurate prediction of wind profile. In addition, yearly wind power can be calculated by using Weibull & Rayleigh distribution. It is found that predicted wind speed is highly affected by friction velocity, atmospheric stability, and averaged roughness length. It is concluded that Rayleigh distribution provides greater power generation than the Weibull distribution, especially for low wind-speed condition.

Nomenclature

H : wind speed measurement height(4.8m)
z_0 : roughness length scale(m)
L : Monin-Obukhov length scale(m)
a : power law exponent
k : Karman constant
k : shape parameter
c : scale parameter

1. 서 론

최근 고갈되는 화석연료와 심각한 환경오염으로 인해 신재생에너지에 대한 관심이 증가되고 있다. 신재생에너지 중 풍력은 교토의정서의 2차 탄소감축을 위해 국가정책 상 많은 투자가 이루어지고 있는 반면 보다 많은 풍력자원확보를 위해서는 정확한 자료와 경제성 분석이 선행되어져야 한다. 또한, 최근 들어 풍력요소부품 제조기술의 급격한 발달과 보다 많은 양의 전력을 얻기 위한 풍력 발전기의 대형화 추세에 의하여 풍황이 우수한 육상의 산지주위나 해상 및 인근 연안에 대규모의 해상 풍력발전단지가 많이 거론되고 있다. 특히 제주도는 국내 풍력실증단지의 대표적인 지역으로 현재 북제주의 월정 풍력기지에서는 1.5MW의 풍력 발전기가 이미 설치/운영되고 있다.

정확한 풍황 예측을 위해서 레이더/라이더, 윈드프로파일러, 컵 유속계, 윈드 베인 등 많은 측정 장비를 통한 실제 현장실측 위주로 이루어지고 있으나, 측정지역의 국부 지표면의 형상이라든가 국지적 기상조건(예, 온도/습도/압력 등)의 변화에 따른 예기치 않은 변수에 의해 풍황의 예측은 어려워질 수 있다. 따라서 본 연구는 제주도의 풍력발전 유력 후보지 가운데 월령해안에 위치한 풍력연구기지에서 풍속 및 기상측정 장비들을 설치하여 그 주변 측정 지역에서의 풍력자원에 대한 통계적인 분석을 실시하여 해당 지역의 풍력발전에 대한 방향을 제시하고자 한다.

풍력 발전에 고려해야할 주요 인자들 중 하나는 지표면 근처 대기의 평균 풍속으로 그 크기에 따라 발전기의 용량이 결정되고, 연간 생산되는 전기량

1) 부경대학교 기계공학부
E-mail : head0743@naver.com

2) 부경대학교 기계공학부
E-mail : hclim@pknu.ac.kr
Tel : (051)629-6141 Fax : (051)629-6150

을 미리 산정할 수 있다. 지표면의 풍속은 국부적인 거칠기 상태에 따라 지표근처에서는 높은 풍속구배를 멀리서는 낮은 변화를 가지며, 이는 연직 전단류의 기울기를 예측하고 풍력로터 및 블레이드의 공기역학적 설계 시에 우선시되는 중요한 인자로 고려되다.[1][2][3] 따라서 정확한 설계를 위해서는 풍력발전기가 설치되는 높이에서의 풍속과 연직 전단류에 대한 정보가 필수적이다. 하지만, 높은 측정비용과 시간상의 제약에 의해 지표근처에서 측정된 유속과 전단응력 값을 이용하여 지형에 따른 표면조도를 계산하고, 전단류를 포함한 풍속 분포를 간접적으로 예측한다. 본 연구에서는 이런 연구 선상에서 표면조도를 이용하여 경계층의 풍속 분포를 예측하는 대표 모델 3가지를 적용하여 제주도 월령지역의 풍황 특성을 분석하고자 한다.

지표면의 국부적 형상 이외에 대기 경계층을 형성하는 데 영향을 미치는 인자들의 연구에 있어 최근 2004년 Bernhard Lange의 논문을 인용하면, 대기안정성이 안정영역(stable regime)에 있을수록 연직 전단류의 높이가 커지는 것으로 제시한 바 있다. 이러한 현상에 대해 그는 안정영역에서 경계층의 풍속구배가 커지는 것은 지표면에서 반사되는 복사열에 의해 발생된 뜨거운 공기의 이류에 의한 것으로 설명하고 있다.[4] 이를 확인하기 위해서는 대기가 안정한 상태에서 여러 가지 대기의 주요 인자들에 대한 영향에 대한 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 모닌오브코프 길이와 표면조도를 대기안정도를 대표하는 인자들로 가정하고, 멱법칙법의 멱지수를 통해 그 영향을 분석하고자 한다.

현장에서 측정된 풍속은 확률분포함수를 적용하여 연간 풍력 발전 에너지를 예측 및 경제성에 대한 평가를 수행하게 된다. 특히, 여러 가지 확률분포함수 중 와이블 함수와 레일리 함수가 일반적으로 풍속 도수분포결과와 잘 일치하고 세계적으로 널리 사용되고 있다.[5][6][7] 본 연구에서는 현장에서 실측된 풍속데이터를 이용하여 계산된 표면조도의 결과에서 세 가지 경계층 풍속 구배를 계산하였으며, 이 결과들을 와이블 함수와 레일리 함수에 적용하여 향후 미래 풍력발전가능성에 대해 분석하였으며, 추가적으로 멱지수를 변화시켜 그 변화 특성을 비교 연구하였다.

본 연구에서는 다양한 경계층 풍속 분포 예측 방법을 사용하여 측정 지역의 지형과 지물, 대기 안정성 분포의 영향 등을 살펴 보고자 하였다. 또한 주어진 실험 환경과 분석 결과에 대한 비교 분석을 통하여 연구 결과에 가장 적합한 경계층 풍속 분포 예측 방법을 도출하고자 하였다.

2. 실험 및 계산 방법

기존 연구에서는 현장에서 측정된 풍황 데이터를 이용하여 스펙트럼 분석과 평균 풍속, 주풍향 등을 계산하여 측정 지역인 제주도 월령지역의 평균적인 풍황 특성에 대해 분석하였다.[8] 또한, 측정한 결과들에 여러 가지 표면조도 획득기법들을 이용하여 얻어진 평균 표면조도와 대기안정성과의 관계에 대한 분석도 보고되었다.[9] 하지만 기존의 결과들은 풍력발전을 위한 지형과 대기조건에 대한 기초연구로서 발전기 설치에 대한 타당성에 대한 실질적인 분석은 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 앞서 선행 연구 결과를 바탕으로 제주도 월령지역의 풍력 발전기 설치에 대한 타당성을 분석하고자 한다.

보다 정확한 풍자원량 분석을 위해서는 수십 미터 가량의 높은 타워에 풍속측정기를 여러 높이에 다양하게 설치하여 풍황을 측정 및 평가하여 풍력발전량을 예상하는 것이 이상적이지만, 본 연구에서는 비용 및 측정상의 제약에 의해 약 5m 높이에서만 이루어졌다. 따라서 고정된 높이에서 측정된 풍속을 이용하여 실제 풍력발전기가 설치될 예상 높이에서의 풍력 예측은 풍속자체의 보정이 필요하며, 또한 이를 위해서는 주변지형지물에 의한 표면조도의 값 산출이 선행되어야 한다. 표면조도 산출을 위해서 기존에 널리 알려진 공식인 대수분포법을 사용하였으며, 대기안정성의 판단은 모닌오브코프길이를 통하여 계산하였다. 모닌오브코프길이 L은 그 역수인 값 H/L을 기준으로 범위가 $0.2<H/L<2$ 이면 안정조건, $-5<H/L<-0.2$ 이면 불안정조건, 그리고 그 외에서는 중립대기조건으로 분류된다. L은 다음 식(1)과 같이 정의 할 수 있다.[9][10]

$$L = -\frac{u_*^3}{k\frac{g}{T_0}\overline{\theta' w'}} \tag{1}$$

여기서 L은 모닌오브코프길이를 나타내고 있으며, k는 카르만 상수(k=0.4), g는 중력가속도(g=9.81m/s^2), T_0는 평균 대기온도를 나타내고 있다. $\overline{\theta' w'}$은 열유동항(heat flux)을 가리키는데 θ' 평균온도 섭동성분과 w' 수직풍속 섭동성분의 곱으로 나타낼 수 있다.

2.1 풍속 분포

실측을 통해 산출된 표면조도는 경계층 유속 구배를 결정하는 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 주이진 식(3)에서 마찰유속을 계산하였으며 계산된 마찰유속은 식(2)와 평균풍속들을 이용하여 표면조도를 산출해 내었다.[11] 그러나 아래 식(2)를 이용한 표면조도의 계산은 대기의 상태가 중립대기상태 즉, 모닌오브코프길이가 $-0.2< H/L<0.2$ 범위 내에 있을 때 적용이 가능하다.

$$u_h = \frac{u_*}{k}\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \tag{2}$$

$$u_* = \sqrt{-\overline{(u'w')}} \tag{3}$$

여기서, u_h는 높이 h에서의 평균 풍속, u_*는 마찰유속(friction velocity), h는 측정 높이 그리고 z_0는 표면조도를 나타내고 있다.

식(1)을 이용하여 모닌오브코프길이를 계산하고, 중립대기상태에서 구해진 표면조도를 아래와 같이 정의된 3가지 풍속분포 공식에 적용하였다. 특히, 본 연구에서는 각각의 풍속분포 예측 모델식에 표면조도를 적용하는 방법에 대해 풍향각 별로 평균된 표면조도와 풍향각에 대한 평균 과정을 거치지 않고 표면조도를 적용하여 그 영향을 살펴보고자 한다.[3][12][13]

1) 대수분포법(Logarithmic profile method)

대수분포법은 기상 및 대기공학분야에 널리 알려져 있는 풍속분포 산출기법이다. 특히, 대기 상태가

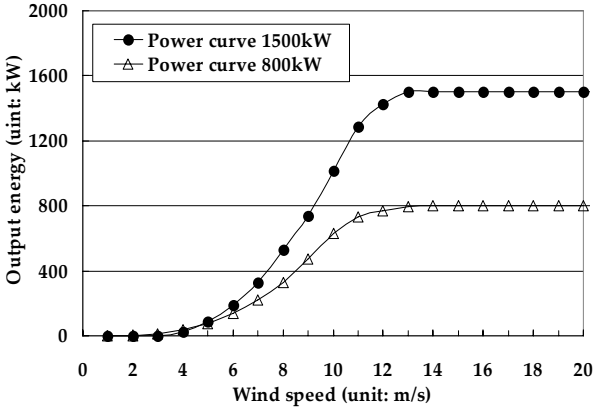

Fig.1 Wind turbine power curve of 800KW & 1,500KW

중립대기조건 일 경우 대기경계층은 대수풍속분포를 일반적으로 가지며, 아래에 정의된 식(4)와 같이 표현할 수 있다.[14][15]

$$u_z = \frac{u_*}{k}\ln(\frac{z}{z_0}) \quad (4)$$

z는 예측 풍속 높이, U_z는 z높이에서 평균풍속을 나타내고 있는데 구해진 마찰유속과 표면조도를 이용하여 경계층의 풍속 구배를 산출할 수 있다.[1]

2) 프로파일법(Profile method)

아래 제시된 식(5)는 프로파일법을 나타내고 있는 식으로 대수법칙과 더불어 많이 적용되고 있는 식이다.

$$u_z = u_h(\ln\frac{z}{z_0})/(\ln\frac{H}{z_0}) \quad (5)$$

여기서, H와 U_h는 각각 풍속 측정높이와 평균 풍속으로 본 연구에서의 H는 본 연구에서 측정된 높이(약 4.8*m*)를 나타낸다. 특히 식(5)는 실측현장에서의 표면조도를 산출하는데 넓리 사용되고 있으며, 두 가지 이상의 높이에서 풍속측정을 했을 경우에 효과적으로 적용이 가능하다. 하지만 본 연구와 같이 한 가지의 측정높이에서의 풍속 측정이 수행된 경우에는 식(2)를 통해 계산된 표면조도를 식(5)에 적용하여 경계층 풍속을 예측할 수 있었다.[1]

3) 멱법칙법(Power law method)

지표면의 특정한 높이에서 기준 풍속과 임의의 높이 z에서 예측된 풍속사이의 관계는 앞서 언급된 식(4)와 같이 대수분포법에 의한 식으로 표현할 수 있다. 또한, 공학적으로 널리 사용되는 식(6)과 같이 멱법칙법으로 나타낼 수 있다.

$$u_z = u_h(\frac{z}{H})^a \quad (6)$$

여기서 a는 멱지수를 나타내는데 Davenport의 표면조도 분류표와 마찬가지로 일정한 지형 지물의 상태에 대해 대표적인 값을 제시하고 있는 상수로써, 본 연구에서는 보다 정확성을 기하기 위하여 아래 식(7)을 적용하여 멱지수를 10분 간격으로 평균을 취하고 관련 기상자료들을 계산하였다.[2][15] 멱지수 계산에 사용되는 인자는 모닌오브코프길이(L)와 표면조도(z_0)가 대표적이며 H는 특정 측정높이(본 실험에서는 4.8*m*)를 나타낸다.

$$a = \left[1+4.7(\frac{H}{L})\right]/\left[\ln(\frac{H}{z_0})+4.7(\frac{H}{L})\right] \quad (0<a) \quad (7)$$

2.2 와이블 & 레일리 분포도

기존의 많은 풍력관련 연구자들은 풍황의 예측모델로서 와이블 분포도와 레일리 분포도를 이용하여 특정지역의 풍력발전에 대한 예측과 발전기자체의 성능모델을 분석하고 있으며, 본 연구에서도 월령이라는 실제 풍력발전 후보지에서 실측을 수행하여 풍력발전예측모델을 분석하고자 하였다.

풍속 데이터 분석을 할 경우 확률분포함수는 여러 가지로 풍속특성을 파악하는데 유용하다. 그 중 가장 많이 적용되는 것은 와이블과 레일리 함수로서 측정된 지역의 특성에 따라 장단점을 가지고 있다.[16] 와이블 함수는 일반적으로 사용되는 감마 함수의 특수 경우로서 두 개의 인자를 가지고 있다. 아래 식(8)은 와이블 함수의 기본 형태식을 나타내고 있다.

$$f(V) = \frac{k}{c}(\frac{V}{c})^{k-1}\exp[-(\frac{V}{c})^k] \quad (k>0,\ V>0, c>1) \quad (8)$$

여기서, V는 측정된 기준풍속을 나타내며 k는 형상계수, c는 척도계수를 나타낸다.[17]

식 (9)는 두 번째 확률분포함수, 즉 레일리 함수로서 와이블 함수의 형상계수 k=2에 대응하는 특수한 경우이다. 따라서 와이블 분포가 2개의 파라미터인 척도계수와 형상계수를 갖는데 대하여 레일리 분포는 척도계수만을 파라미터로 하는 함수가 된다. 결과적으로 레일리 분포는 평균풍속에만 의존하는 것이 되어 풍속분포를 추정하는 것도 용이하게 된다.

각각의 확률분포함수에 대한 계수 값의 결정은 높이 75*m*에 대해 예측된 풍속의 분포를 이용하여 레일리, 와이블 함수의 계수를 조정하여 최대한 일치시키는 Curve-fit 방법을 사용하였다.

$$f(V) = \frac{\pi}{2}\frac{V}{c^2}exp[-\frac{\pi}{4}(\frac{V}{c})^2] \quad (9)$$

아래 식(10)은 풍력발전량을 나타내는 식으로 *P(V)*는 풍속 V의 경우 발전기의 출력을 나타내며, *f(V)*는 앞서 나타낸 와이블과 레일리함수에 의한 풍속 *V*의 출현확률을, 그리고 T는 시간을 나타내고 있다. 본 연구에서는 주어진 풍황에 대해 연간 발전량 계산을 위해 시간(T)에 8760*h*을 적용하였으며, Fig.1의 Nordex사 S70/1500KW 제품과 Enercon E53 800KW의 출력 곡선(power curve)을 이용하여 *P(V)* 값을 설정할 수 있었다.

$$P_w = \sum[P(V)\times f(V)\times T] \quad (10)$$

3. 결과 및 분석

3.1 풍속 분포의 예측

Fig.2는 실측에서 구한 풍황 데이터를 이용하여 대기안정성과 멱법칙법의 멱지수와의 관계를 나타내고 있는 그래프이다. 그림에서 x축은 대기안정성

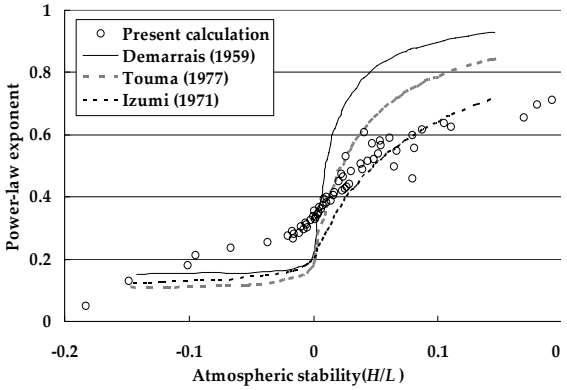

Fig.2 Power law exponent vs atmospheric stability

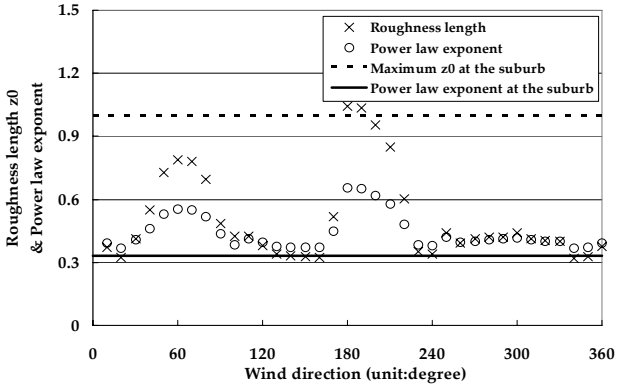

Fig.3 Roughness length and power law exponent vs azimuth angle

을 나타내는 지표인 *H/L*, 여기서 *H*는 측정높이를 나타내며 *L*은 앞서 정의한 모닌오브코프길이를 나타내고 있다. y축의 멱지수는 식(7)을 통해 계산된 결과로 대기안정성에 의한 멱지수의 분포를 확인할 수 있는데, 멱지수는 중립대기조건(-0.2<*H/L*<0.2)에서 급격한 증가를 나타내고 있으며, 안정영역(0.2<*H/L*<2)으로 갈수록 점진적인 증가하는 것을 확인할 수 있는데 이는 1993년 Zoumakis의 연구 결과와 매우 유사한 경향을 보이고 있다.[2] Petersen의 경우 경계층 풍속 분포가 대기안정성에 따라 확연한 차이를 보여주었다. 그는 논문에서 30*m* 이상의 높이에서 안정대기조건의 풍속분포는 높이가 증가할수록 지속적으로 풍속이 증가하는 것을 확인하였으며 불안정대기조건에서는 이와 반대로 풍속의 변화가 크지 않는 것을 보여주었다.[18] 이를 통해 안정대기조건에서의 멱지수 값의 증가와 불안정 및 중립대기조건의 멱지수 분포에 대한 예측 신뢰도를 높일 수 있다.

Fig.3은 경계층을 나타내는 중요한 인자인 표면조도와 멱지수를 풍향각별로 평균하여 나타낸 그래프이다. 범례의 점선과 실선은 앞서 언급한 교외 주변의 표면조도 분류표와 멱지수 분류표에 따른 월령지역 주변 지형지물 상태에 대한 표면조도와 멱지수를 나타내고 있다. 본 연구에서 구해진 표면조도는 전체적으로 z_0<1, 멱지수는 *a*>0.333의 영역에 존재한다. 그림에서 표면조도와 멱지수는 전반적으로 비슷한 경향을 보이고 있으며, 풍향각에 따라 지형 지물의 영향을 잘 나타내고 있다.[5][6] 그림에서 측정에 의해 구해진 표면조도의 경우 30°~80° 영역과 180°~240° 영역에서는 측정지점 주위 가까운 거리에 위치한 큰 나무와 모니터링 빌딩들에 의한 표면조도가 이상적으로 높아진 것을 확인할 수 있다. 이것은 과거 Davenport의 표면조도분류표에 지적한 낮은 건물 주위와 큰 건물이 일정하게 분포한 표면조도영역인 0.5와 1사이의 영역 값과 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 멱지수의 경우 그 값의 분포가 대부분이 교외 주변의 지표 상태를 나타내는 0.333 이상의 값을 얻었다. 즉, Fig.2의 결과를 참고하면 중립대기조건이 실측결과의 70%이상을 차지하고 있으며, 이는 상대적으로 모닌오브코프길이의 절대값이 매우 크다는 것을 뜻한다.[9] 중립영역이 지배적인 결과에 대해 Barthelmie는 주기성을 가지는 모닌오브코프 길이가 계절 및 날씨, 바람의 세기 그리고 태양열의 세기 등에 크게 영향을 받는다고 밝히고 있다. 특히 바람이 강할 경우 열유동 운동에너지의 크기가 상대적으로 작아짐으로 인해 중립 영역이 지배적일 수 있다는 것을 지적한 바 있다.[1] 이로 인해 실제 멱지수 계산에 있어서 거의 대부분의 분포가 Fig.2와 같이 중립대기조건에 집중되고, 멱지수 값의 분포가 전체적으로 증가한 것으로 판단된다.

Fig.3의 표면조도와 멱지수는 풍향각 별로 풍속을 평균하여 각각의 값들을 산출하였으며, 풍속분포를 예측할 수 있도록 하였다. 그러나 Fig.4에서는 풍향각에 따라 평균된 표면조도와 멱지수를 사용하지 않고 우선 10분마다 평균한 풍속과 표면조도, 그리고 멱지수 등을 계산해 내었다. 이후, 앞서 정의한 3가지 풍속분포법을 이용하여 높이 30*m*, 50*m*, 75*m* 그리고 100*m* 등의 높이에서 풍속을 풍향각에 따라 각각 평균하여 표시한 그래프이다. 반면 Fig.5는 Fig.3의 결과처럼 풍향각에 따라 평균된 표면조도와 멱지수를 풍속데이터에 적용하여 풍속분포를 예측한 결과이다. Fig.4와 Fig.5의 결과를 서로 비교해 보았을 때 우선 프로파일법으로 예측한 풍속이 확연한 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 즉, 대수분포법과 멱법칙법, 두가지 경우에는 표면조도항의 시간의 주기에 따라 평균한 결과가 그리 많은 차이를 보이지 않았으나, 프로파일법의 경우 수식(5)의 분자와 분모항에 표면조도항이 동시에 들어 있으며, 10분 간격의 표면조도평균과 총 풍속데이터의 풍향각에 따른 표면조도 평균값 차이에 의하여 서로 많은 차이를 보이고 있다. 따라서 풍향각 별로 평균된 표면조도를 사용하는 것이 프로파일법에서는 반드시 필요한 것으로 판단된다.

대수분포법을 통한 풍속예측은 특히 풍향각 80°~130°에서 다른 풍속 예측 모델의 풍속과 달리 비교적 크게 예측된 것을 볼 수 있다. 이런 차이점에 대해서 프로파일법과 멱법칙법 모델의 경우 풍속 예측에 있어서 각각 표면조도와 멱지수를 사용하여 풍속을 예측하지만 대수분포법의 경우 마찰유속이라는 인자에 의해 이런 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 풍향각 80°~130° 범위의 마찰유속은 약 0.1~0.2*m/s*로써 다른 풍향각에 비해 비교적 낮은 수치를 가지고 있으며 이로 인해 해당 풍향각에서의 풍속이 다른 식들에 의한 결과에 비해 큰 값이 도출된 것으로 판단된다.[8]

그 외에 멱법칙법에 의한 결과 값이 다른 두 식들에 비해 상대적으로 큰 것을 관찰할 수 있다. 여기서 주목할 점은 Fig.5에서 다른 측정 높이에 비해 높이 30*m*에서의 풍속이 3가지 풍속예측 모델의 결과가 0~2*m/s*의 차이를 나타내며 비교적 비슷한 분포를 가

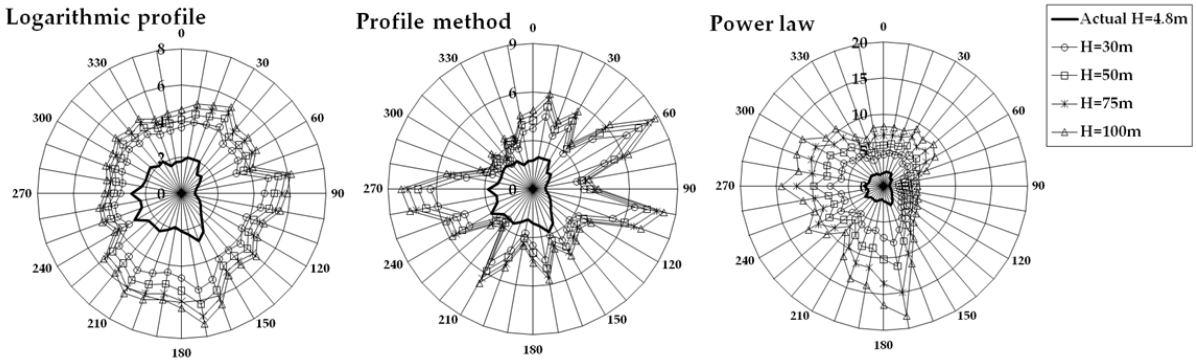

Fig.5 Wind speed profile by using roughness length and power law exponent averaged at each azimuth angle.

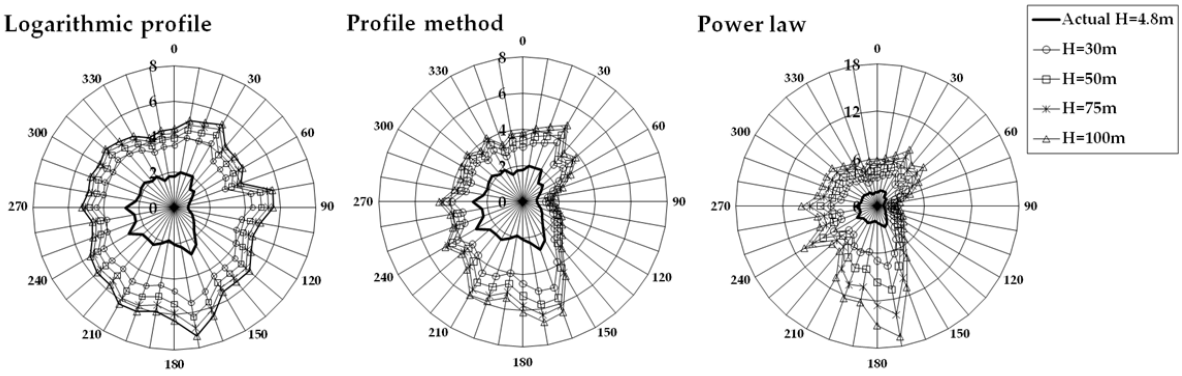

Fig.4 Wind speed profile averaged at every 10 mins by using logarithmic profile, profile method, and power law.

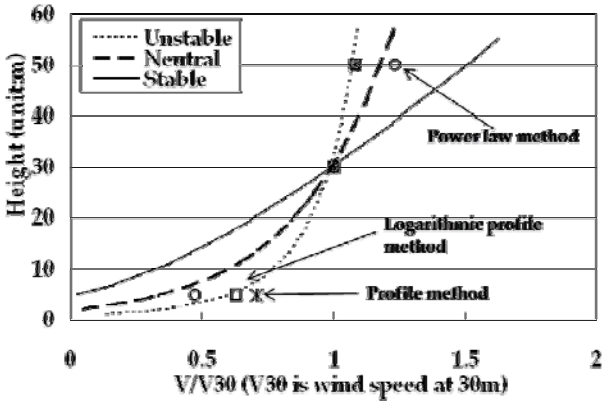

Fig.6 Wind profile shape under neutral, stable and unstable condition with same roughness length.[18]

지고 있다는 것이다. 기존 연구 중 Petersen의 결과를 나타내는 Fig.6과 같이 불안정, 중립 그리고 안정 영역을 나타내는 각 선들은 대기안정성에 따라 경계층 유속 분포를 나타내고 있으며, 대기안정성에 의해 분류되는 풍속 분포가 높이 30*m*에서는 거의 유사한 수치를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.[18] 이와 같은 기존 연구 결과를 본 연구의 측정지역 주위 장애물이 없으며 가까운 거리에 해안이 존재하는 풍향각 270°에서 경계층 풍속 분포와 비교해 보았을 때, 멱법칙법에 의한 결과 값은 Petersen의 안정영역과 중립영역 사이에 경계층 유속 분포가 나타내고 있으며, 대수분포법과 프로파일법은 중립영역의 풍속 분포와 유사한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 멱법칙법에 의한 풍속 분포는 대수분포법과 프로파일법과는 달리 풍속이 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Fig.2와 3의 결과와 같이 중립 대기조건이 지배적인 실측 환경으로 인해 멱지수 값이 매우 크게 나타난 것이 본 연구와 같은 풍속분포를 만들게 한 것으로 판단된다.

3.2 와이블 & 레일리 분포도와 풍력 에너지

지금까지는 세 가지 풍속 분포식에 의해 여러 가지 높이에서의 풍속을 예측하였으며 계산된 풍속 데이터를 이용하여 확률 분포도를 확인할 수 있었다. 이와 같이 계산된 확률 분포도는 와이블과 레일리 함수의 척도계수 및 형상계수결정에 사용되며 풍력발전기의 연간 에너지 생산량을 참고식(10)을 통해 예측가능하게 해준다. 실제 풍력발전기의 출력성능을 벤치마킹하고 연간발전량을 산출하기위하여 제주도 월정기지에서 운행되고 있는 1.5MW 풍력발전기를 참고로 출력곡선을 활용하였다. 이 경우 발전기의 허브높이는 75*m*로 가정하였으므로 이 높이에서 주어진 풍속분포식과 풍속데이터들을 이용하여 와이블과 레일리 분포도의 계수들을 결정하였다. 또한 추가적으로 1.5MW보다 현재 국내에서도 많은 실용화가 되어있는 800KW급 풍력발전기 출력곡선도 참고로 1.5MW의 결과와 비교해 보았다. Table.1은 와이블과 레일리 분포도의 각 계수 값을 나타내고 있으며, Table.1에서 대수분포법과 프로파일법의 각 계수 값은 서로 비슷한 반면, 멱법칙법에 의한 방법은 척도계수가 비교적 크게 나타나고 있다. 이는 앞서 언급한 멱지수가 큰 값을 가짐에 따라 경계층

Table.1 Shape parameter and scale parameter about various wind profile equations

		Used averaging z_0 and a			Instantaneous reading		
Constant parameter		Logarithmic profile	Profile method	Power law	Logarithmic profile	Profile method	Power law
Weibull	k	2.2	1.9	1.8	2.1	2.2	2
	c	5.3	5.3	9.5	5.6	4.9	9
Rayleigh	c	4.9	4.9	8.6	4.9	4.3	7.4

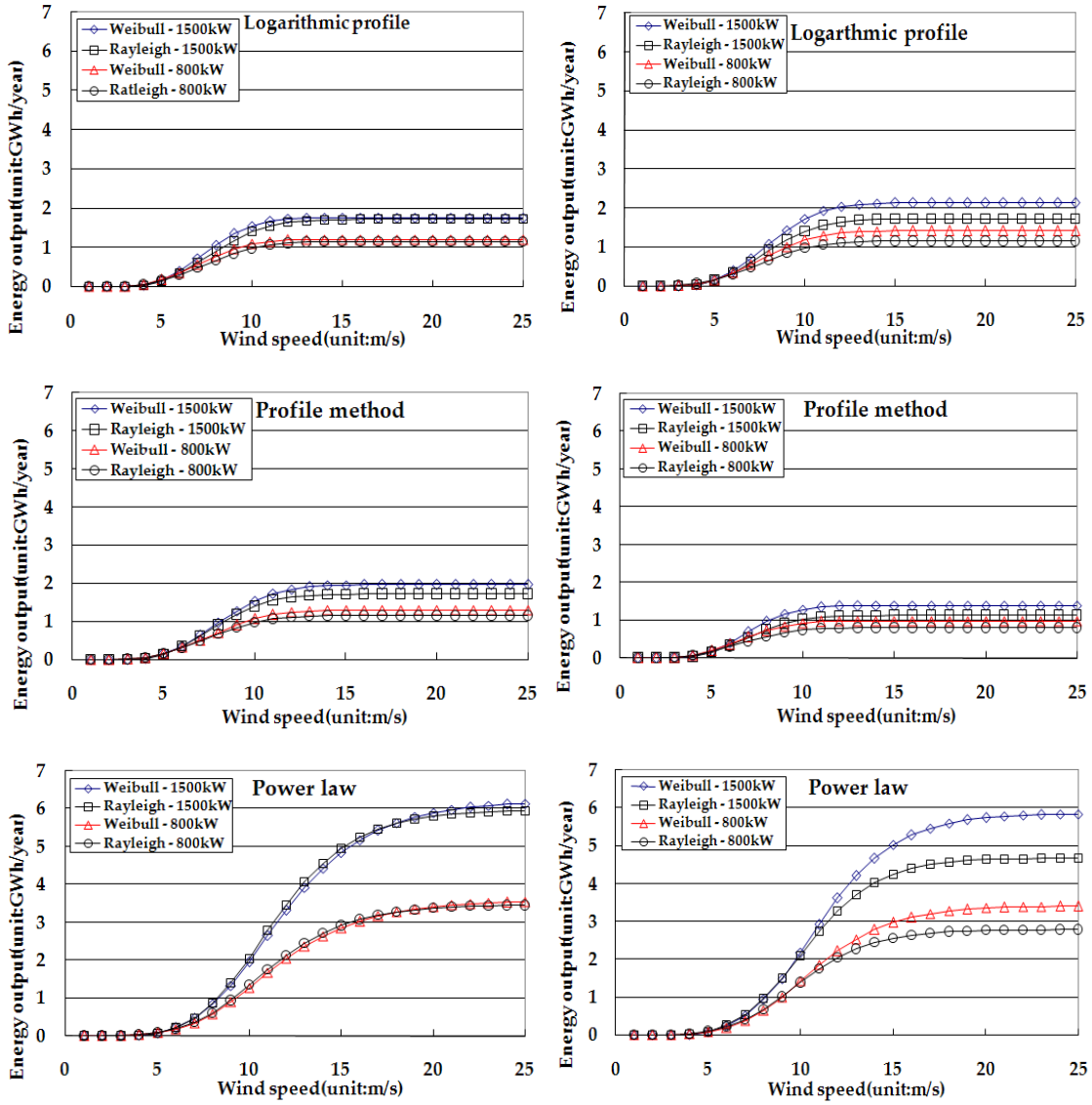

Fig.7 Wind power output using Weibull & Rayleigh distributions with three wind profile equations.

Fig.8 Same as the Fig.7, but averaged roughness length .

의 풍속 분포가 Fig.4와 5의 멱법칙법으로 도출한 풍속분포와 같이 고풍속에(10*m/s*이상) 걸쳐 넓게 분포된 결과임을 알 수 있다.

풍속의 도수분포를 이용하여 결정할 수 있는 형상계수와 척도계수는 이후 1.5MW와 800KW의 풍력발전기 출력곡선을 적용한 식(10)을 통해 해당 풍속의 발전량을 계산 할 수 있다. 본 연구에서는 각 1*m/s* 단위의 풍속에서 계산된 발전량을 순차적으로 더하여 Figs.7과 8에서와 같이 연간 발전량을 계산할 수 있었다. Fig.7은 표면조도와 멱지수를 평균하지 않고 예측한 발전량이며, Fig.8은 풍향각 별로 평균된 표면조도와 멱지수를 적용하여 계산된 결과를 나타내고 있다.

앞서 기존의 발전기의 참고그림인 Fig.1에서의 출력곡선을 살펴보면 두 개의 발전기가 13*m/s*에서 정격풍속이 이루어지게 되는데, Figs.7과 8의 대수분포법과 프로파일법의 결과에서는 풍속 13*m/s* 이상에서는 에너지의 획득이 거의 없었으며, 반면 멱법칙법에 의한 결과는 4~25*m/s*의 넓은 풍속 범위에서 에너지를 얻는 것을 확인할 수 있다. 와이블 분포도에

의한 결과와 레일리 분포도에 의한 결과를 비교해 보면 와이블 분포도에 의한 결과에 레일리 분포도 보다 비교적 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 와이블 분포도는 풍속 도수 분포도를 통해 계수 값을 구할 때,

형상계수와 척도계수, 두 가지의 계수를 결정하여 도수분포에 최대한 근접시킬 수 있는 반면, 레일리 분포도는 척도계수만을 통해 분포를 결정하기 때문이다. 실제 풍속 예측결과에서는 저 풍속 영역 1~6*m/s*에 풍속이 집중되어 있는데 레일리 분포도의 척도계수는 6*m/s*이상의 풍속에 대해서 그 분포를 잘 일치시키지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

Figs.7과 8을 비교해 보면, 표면조도나 멱지수에 대한 평균화의 유무는 예상 발전량에 큰 영향을 주지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 각 풍속예측 모델 별로 발전량에 차이가 나타나고 있으며, 특히 멱법칙법으로 예측한 발전량은 대수분포법과 프로파일법과는 달리 매우 큰 발전량이 계산되었다. 이렇게 큰 발전량은 앞서 언급하였듯이 중립조건이 지배적인 측정 환경에 의해 멱지수 α값이 비정상적으로 크게 계산된 것에 원인을 찾을 수 있다. 반면, 대수분포법과 프로파일법의 결과는 서로 비슷한 출력을 예측할 수 있었는데, 특히 대수분포법을 통한 결과 값의 경우 중립조건이 지배적인 본 연구의 측정 환경에 매우 적절하다고 판단할 수 있다. 본 연구에서 사용된 대수분포법 공식은 대기안성성이 중립조건에 해당할 경우 사용되는 공식으로 비정상적으로 높게 나타난 멱법칙법이나 대기안정성이 전혀 고려가 되지 않은 프로파일법에 비해 대수분포법이 본 연구 환경과 결과에 가장 적합한 것으로 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 제주도 월령기지에서 측정된 풍속 데이터를 기반으로 해당지역의 풍력발전가능성을 연구하기 위해 여러 가지 경계층 공식과 표면조도 및 멱지수의 계산법을 이용하여 풍속분포도를 예측하였다. 예측된 풍속 데이터를 이용하여 로터 허브의 기준 높이인 75*m* 높이에서의 800KW와 1,500KW의 풍력발전기의 연간 발전량을 예측할 수 있었으며, 이에 대한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 대수분포법, 프로파일법, 멱법칙법과 같이 널리 사용되고 있는 경계층 풍속 분포식을 이용하여 풍속 분포를 확인 할 수 있었다. 그 결과, 대수분포법은 표면조도의 값과 마찰유속에 의해 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었으며, 중립영역이 대부분인 본 연구의 측정 환경에 다른 두 가지 공식에 비해 적합하다고 판단 할 수 있었다.

2. 프로파일법은 표면조도의 적용에 있어서 풍향각 별로 평균된 표면조도 값을 적용하는 것이 10분 단위로 계산된 표면조도를 적용하는 경우보다 안정적인 결과를 나타내는 것을 다른 두 공식의 결과와 비교한 결과 확인 할 수 있었다.

3. 멱지수를 통해 계산할 수 있는 멱법칙법은 측정 지역의 특성상 중립대기조건이 지배적인 대기안정성에 의한 영향으로 멱지수 값의 비정상적인 증가를 관찰 할 수 있었다. 멱지수의 증가는 멱법칙법을 통한 풍속 분포 예측에 있어서 다른 두 공식에 비해 매우 큰 풍속 분포를 나타내고 있기 때문에, 멱법칙법을 통한 결과 값의 신뢰성이 적다고 판단된다.

4. 대수분포법, 프로파일법, 멱법칙법으로 예측한 75*m* 높이에서의 풍속데이터를 이용하여 와이블 분포도와 레일리 분포도의 형상계수와 척도계수를 결정할 수 있었으며, 결정된 각 계수들을 통해 풍력발전기의 발전량을 예상할 수 있었다. 대수분포법과 프로파일법을 통한 발전량은 멱법칙법을 통한 발전량에 비해 비교적 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 레일리 분포도에 의한 발전량과 와이블 분포도에 의한 발전량이 서로 차이가 나타나고 있는데, 와이블 분포도의 두개의 계수를 통한 계산 결과에 비해 레일리 분포도의 척도계수만을 통한 계산이 비교적 정확하지 못한 것을 확인할 수 있었다.

후기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다. 또한 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

References

(1) Barthelmie, R.J., Palutikof, J.P. and Davies, T.D., 1993, "Estimation of Sector Roughness Lengths and the Effective on Prediction of the Vertical Wind Speed Profile," Boundary-Layer Meteorology, Vol.66, pp. 19-48(R).

(2) Zoumakis, N. M., 1993, "The Dependence of the Power-law Exponent on Surface Roughness and Stability in a neutrally and Stably Stratified Surface Boundary Layer," Atmosfera, Vol.6, 79-83

(3) Mansoureh, T., 2009, “The Estimation of the Wind Speed in Urban Areas,” Int. J. Ventilation, Vol.8, No.2, pp.75-84.

(4) Lange, B., Larsen, S., Hojstrup, J., and Barthelmie, R.J., 2004, "Importance of Thermal Effects and Sea Surface Roughness for Offshore Wind Resource Assesment," J. Wind Eng. Ind. Aero., Vol.92, pp. 959-988.

(5) Ulgen, K..and Hepbasli, A., 2002, "Determination of Weibull Parameters for Wind Energy Analysis of Izmir, Turkey," Int. J. Energy Res. Vol.26, pp. 495~506.

(6) Ozerdem, B., Ozer, S. and Tosun, M., 2006, "Feasibility Study of Wind Farms: A Case Study for Izmir, Turkey," Journal of WEIA, Vol.94, pp. 725-743

(7) Hu, S.-y., Cheng, J.-h., 2007, "Performance Evaluation of Pairing between Dites and Wind Turbines," Renewable Energy, Vol.32, pp. 1934-1947.

(8) 정태윤,임희창, 김현구, 장문석, 2008, "풍력 확용을 위한 월령 연안 지역 풍황 평가 ," 한국 풍공 학회, Vol.12, 3, pp. 219-026.

(9) 정태윤,임희창, 김현구, 장문석, 2009, "월령 연안지역 대기경계층의 유동특성과 대기 안정성에 대한 고찰," 한국환경과학학회,

Vol.18, pp. 857-865
(10) Yahaya, S., Frangi, J.P. and Richard, D.C., 2003, "Turbulent Characteristics of a Semiarid Atmospheric Surface Layer from Cup Anemometers - Effects of Soil Tillage Treatment (Northern Spain)," Ann. Geophys, Vol.21, pp. 2119-2131.
(11) Grimmond, C.S.B., King, T.S., Roth, M. and Oke, T.R., 1998, "Aerodynamic Roughness of Urban Areas Derived form Wind Observations," Boundary-Layer Meteorology. Vol.89, pp. 1-24.
(12) Verkaik, J. W., Holtslag. A. A. M., 2007, "Wind Profiles, Momentum Fluxes and Roughness Lengths at Cabauw Revisited," Boundary-Layer Meteorol, Vol.122, pp. 701-719
(13) Sozzi, R. and Favaron, M., 1998, "Method for Estimation of Surface Roughness and Similarity Function of Wind Speed Vertical Profile," Journal of Applied Meteorology, Vol.37, pp. 461-469.
(14) Barthelmie, R.J., and Palutikof, J.P., 1996, "Coastal Wind Speed Modelling for Wind Energy applications," J. Wind Eng. Ind. Aero., Vol.95, pp. 213-236.
(15) Wieringa, J., 1992, "Updating the Davenport Roughness Classification," J. Wind Eng. Ind. Aero., 41-44, pp. 357-368.
(16) Celik, A. N., 2003, "Assessing the suitability of wind speed probability distribution functions based on wind power density," Renewable Energy, Vol.28, Issue 10, pp. 1563-1574.
(17) Kavak, A.E. and Akpinar, S., 2005, "An Assessment on Seasonal Analysis of Wind Energy Characteristics and Wind Turbine Characteristics, Energy Conversion and Management," Vol.46, Issues 11-12, pp. 1848-1867.
(18) Petersen, E.L., Mortensen, N.G., Landberg, L., Hojstrup, J. and Frank, H. P., 1997, "Wind Power Meteorology", Wind Energy, pp.1-45.