도서지역 소형풍력발전기 에너지 발생량 평가

장춘만^{1†} · 이종성¹ · 전완호² · 임태균²

¹한국건설기술연구원, ²세덕주식회사

Evaluation of Energy Production for a Small Wind Turbine Installed in an Island Area

CHOON-MAN JANG^{1†}, JONG-SUNG LEE¹, WAN-HO JEON², TAE-GYUN LIM²

¹Environmental Engineering Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Daehwa-Dong 283,
Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi, 411-712, Korea.

²Technical Research Lab., CEDIC Co., 371-50, Gasan-Dong, Kumcheon-Gu, Seoul, Korea

Abstract >> This paper presents how to determine AEP(Annual Energy Production) by a small wind turbine in DuckjeokDo island. Evaluation of AEP is introduced to make a self-contained island including renewable energy sources of wind, solar, and tidal energy. To determine the AEP in DuckjeokDo island, a local wind data is analyzed using the annual wind data from Korea Institute of Energy Research firstly. After the wind data is separated in 12-direction, a mean wind speed at each direction is determined. And then, a small wind turbine power curve is selected by introducing the capacity of a small wind turbine and the energy production of the wind turbine according to each wind direction. Finally, total annual wind energy production for each small wind turbine can be evaluated using the local wind density and local energy production considering a mechanical energy loss. Throughout the analytic study, it is found that the AEP of DuckjeokDo island is about 2.02MWh/y and 3.47MWh/y per a 1kW small wind turbine installed at the altitude of 10 m and 21m, respectively.

Key words : Annual energy production(년간 에너지 생산), Wind energy(풍력 에너지), Wind density(풍력 밀도), Numerical prediction(산술적 예측), Small wind turbine(소형풍력발전기)

1. 서 론

최근 들어 국민행복과 삶의 질 향상을 위한 친환경 도시개발과 더불어 관광휴양 시설을 갖출 수 있는 도서지역이 새롭게 주목을 받고 있다. 도서개발은 보존과 개발 양면의 조화와 함께 고립된 지역특성을 고려한 에너지 및 물 자립 그리고 외부로의 무배출

(zero discharge) 설계기술이 필요하다. 따라서 도서 지역의 에너지 자립화를 위해 풍력, 태양광, 조류 등 신재생에너지가 기반이 되어야 한다.

이 중에서 도서지역의 특성을 고려할 때 풍력발전은 발전효율이 상대적으로 높고 장기간 발전이 가능하여 적합한 에너지원으로 알려져 있다. 풍력발전을 위한 단지설계 초기단계에서는 단지 위치선정 과정과 단지 내 풍력발전기 배치설계 과정이 필요하다.

단지 위치선정을 위하여 풍향 조건을 먼저 파악하여야 한다. 도서지역의 풍향 데이터는 한국에너지기

[†]Corresponding author : jangcm@kict.re.kr

[접수일 : 2013.11.27 수정일 : 2013.12.13 게재확정일 : 2013.12.31]

Copyright © 2013 KHNES

술연구원이 2003년부터 2007년까지 5년간 수치기상 예측모델을 이용하여 영토 및 영해를 대상으로 1km×1km까지 풍황 데이터를 기반으로 한반도 국가바람지도(national wind atlas)를 구축하였다¹⁻⁵⁾. 실측자료는 LIDAR (light detection and ranging), SODAR (sonic detection and ranging) 등의 위성영상을 이용하였다. 김현구 및 황효정⁶⁾은 인천 무의도를 포함하여 5개 도서의 해상풍력단지 제안지역에 대한 풍력밀도, 풍속 등을 분석하여 해상풍력단지의 적합성을 평가하였다.

단지 평가는 기상측정 자료를 가지고 산술적으로 발전량을 예측하거나, 추가적으로 단지지형 데이터를 함께 이용하는 방법이 있다. 도서지방의 에너지 자립과 관광지 개발에는 대형풍력발전 못지않게 소형풍력발전기를 태양광 발전과 복합적으로 구성함으로써 보다 안정적인 에너지 공급이 가능하다.

본 연구에서는 인천 덕적도를 대상으로 하여 1kW 소형풍력발전기 설치에 따른 연간 예상발전량을 대한민국 바람지도 데이터를 기반으로 하는 기상측정 자료를 이용하여 산출하였다. 또한 소형풍력발전기 터빈의 설치높이에 따른 연간 발전량도 비교하여 분석하였다.

2. 풍력터빈 선정 및 발전량 예측 수준

덕적도는 인천에서 남서쪽으로 80km 앞바다에 있는 섬으로, 면적은 36m²이다. 덕적도에는 3개의 산이 있으며 이 중에 비조봉은 해발 292m 고도에 있으며, 산 인근으로 풍부한 풍력자원이 있는 것으로 조사되고 있다. 덕적도는 에너지 자립화를 위하여 신재생에너지를 기반으로 하는 에코아일랜드 사업이 2011년부터 진행되고 있으며, 풍력발전을 비롯하여 바이오, 태양광 및 조류발전 등이 새로운 에너지원으로 개발되고 있다⁷⁾.

Fig. 1은 인천 덕적도 모습이며, 지역별로 바람마

Fig. 1 DuckJuckDo island with renewable energy complex plan⁷⁾

Fig. 2 Procedure of annual energy production of a small wind turbine

을과 태양광마을 등 신재생에너지 단지가 현재 개발되고 있다. 2,000명 규모의 덕적도 주민과 관광객 유치에 따른 미래의 리조트 운영을 종합적으로 고려하여 소요에너지에 따른 발전량 계산이 필요하다. 이러한 점을 고려하여 주거단지에 인접하여 설치가 가능하고, 관광자원 효과도 가져올 수 있는 1kW~10kW 급으로 구성된 소형풍력단지(small wind farm)의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 소형풍력단지용 1kW급 소형풍력

을 선정하였으며, 덕적도의 연간 풍향 데이터를 고려한 연간 에너지 발전량을 예측하였다. 본 연구에서 적용한 1kW 소형풍력터빈의 연간 발전량을 예측하기 위한 수순은 Fig. 2에 나타낸다.

3. 풍향분석

3.1 기상측정자료

소형풍력발전을 위한 가장 기본적인 필수조건은 풍부한 바람자원이다. 일반적인 풍력발전기의 파워곡선을 살펴보면 풍속이 3~4m/s에서부터 발전을 시작하여 약 12m/s까지의 구간에서 발전을 하게 된다. 설계 대상지역의 연간 풍량이 대상지역의 수요량에 미달되며 필요한 풍력발전량에 모자라기 때문에 반드시 사전에 기상자료를 이용한 발전량 예측이 필요하다.

기상자료는 한국에너지기술연구원으로부터 제공받은 3km 해상도의 바람지도의 데이터를 기반으로 하였으며, 덕적도 인근 지역에 대한 모든 풍속과 풍향 데이터를 고려하여 평가하였다.

Fig. 3은 한국에너지기술연구원에서 제공한 대한민국 바람지도이며, 높이 10m에서의 풍속을 나타낸다. 바람정보는 1시간 간격으로 2005년부터 2007년까지 3년간의 풍속과 풍향 정보를 포함하는 데이터이다⁴⁾.

Fig. 4는 2007년 12월부터 1개월간의 덕적도 바람정보를 나타낸다. Fig. 4(a)에는 바람속도를 10m 및 72m 높이에서 측정한 데이터이다.

그림에서 알 수 있듯이 바람속도는 시간에 따라 크게 변동함을 알 수 있으며, 측정고도가 높아짐에 따라 바람속도도 증가함을 알 수 있다. 측정고도에 따른 바람속도를 Table 1에 나타낸다.

바람장의 풍속은 지표면의 점성(viscosity) 때문에 고도에 따라 속도가 증가하며, 일반적인 대기경계층으로 알려진 약 500m까지는 지표면이 영향을 받는

Fig. 3 Wind map for Korea peninsula⁴⁾

Table 1 Average wind velocity versus measuring altitude

Measuring altitude, m	10	21	72
wind velocity, m/s	4.9	5.9	6.4

(a) wind velocity

(b) wind direction

Fig. 4 Wind velocity and wind direction in time

다. Fig. 4(b)의 풍향도 바람속도 변화와 같이 시간에 따라 변화함을 알 수 있다.

Table 2 Average wind velocity versus 12 sectors at the altitude of 10m

section no.	1	2	3	4	5	6
wind velocity m/s	4.64	3.72	3.80	3.81	3.73	3.54
section no.	7	8	9	10	11	12
wind velocity m/s	4.10	4.31	3.50	3.62	4.03	4.84

Fig. 5 Windrose of DuckJuckDo island at the altitude of 10m

3.2 덕적도 10m에서의 바람정보

본 연구에서 사용된 바람정보는 앞장에서 설명한 대한민국 바람지도를 이용하였으며, 바람지도 데이터는 인근측정 자료를 이용하여 기상예측 프로그램으로 재 작성된 바람정보이다. 바람정보는 3년간(2005년~2007년)의 정보를 기반으로 하였으며, 한 시간 간격으로 풍속정보와 풍향 정보 그리고 밀도와 압력 등의 대기 정보를 가지고 있다.

Fig. 5는 10m 바람측정 높이에서 서해안 덕적도지역에 대한 풍향의 빈도 및 각 구간별 풍속분포를 나타낸 바람장미(windrose)를 나타낸다. 그림에서 북쪽과 남쪽방향은 각각 1번 및 7번이며, 동쪽과 서쪽방향은 각각 4번과 10번이다. 바람장미는 바람 데이터를 이용하여 풍속과 풍향에 대한 12개의 구간을 설정하고, 이를 통계적으로 분석하여 도출하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 북북서 방향으로 바람의 빈도가 높음을 알 수 있으며, 동풍 및 서풍은 상대적으로 빈도가 낮다는 것을 알 수 있다. 주 바람방향인 북북서

Fig. 6 Frequency distribution of wind velocity at the altitude of 10m

방향의 바람에서 10m/s 이상의 속도분포가 다른 방향보다 많지만, 4m/s 이하의 낮은 속도의 바람도 함께 빈도가 높음을 알 수 있다. 이는 풍향이 주풍향이라고 해서 주 풍속방향으로만 높은 바람이 부는 것이 아님을 나타낸다.

Table 2는 Fig. 5에서 나타낸 12개 구간에서의 평균속도를 나타낸다. 구간별 평균풍속은 최저 3.5m/s에서 최대 4.84m/s까지 고른 분포를 나타내며, Fig. 5에서와 같이 속도빈도가 가장 높은 북북서 방향의 바람속도가 4.84m/s로 가장 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 바람의 풍속빈도를 나타낸다. 그림에 알 수 있듯이 주로 3m/s에서 5m/s사이의 풍속이 가장 많음을 알 수 있다. 지상 10m 위치에서의 덕적도 지역 평균풍속은 약 4.1m/s로 소형풍력발전을 할 수 있는 기본적인 조건을 갖추고 있다고 사료된다.

3.3 덕적도 21m에서의 바람정보

Fig. 7은 해발 21m의 바람측정 높이에서 덕적도지역에 대한 바람장미를 나타낸다. 평균풍속은 4.92m/s로 10m 높이에서의 평균풍속 4.1m/s 보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 경계층 이론에 따라 지면의 점성의 영향이 멀어짐에 따른 현상이다. 바람장미의 주 풍향

Fig. 7 Windrose of DuckJuckDo island at the altitude of 21m

Table 3 Average wind velocity versus 12 sectors at the altitude of 21m

section no.	1	2	3	4	5	6
wind velocity m/s	5.41	4.36	4.36	4.42	4.35	4.19
section no.	7	8	9	10	11	12
wind velocity m/s	5.10	4.88	3.86	4.18	5.08	6.36

Fig. 8 Frequency distribution of wind velocity at the altitude of 21m

은 10m와 같이 북북서 방향임을 알 수 있다.

Table 3의 구간 평균속도에서 알 수 있듯이, 구간별 평균풍속은 최저 3.86m/s에서 최대 6.36m/s까지의 분포를 나타낸다. 즉 최대속도는 10m 높이와 비교하여 약 31% 증가되었다. 바람의 풍속빈도는 Fig.

Fig. 9 Wind turbine power curve

8에서와 같이 10m 높이에서와 같이 3m/s~5m/s 구간에서 가장 높다.

4. 1 kW 소형풍력터빈

본 연구에서는 소형풍력팜으로 확장성을 고려하여 1kW급의 소형풍력발전기를 선정하였다.

Fig. 9는 시장에서 판매되고 있는 1kW급 풍력발전기 파워곡선을 나타낸다. 그림에서와 같이 약 3m/s에서 풍력발전을 시작해서 소형풍력발전기 특징 중 하나인 cut-off없이 25m/s 풍속까지 발전할 수 있는 것을 알 수 있다. 추력계수선도로 알 수 있듯이 3m/s에서부터 약 8m/s 사이에서 가장 에너지 생산이 효율적임을 알 수 있다.

5. 풍력발전량의 산술적 예측

5.1 풍력밀도 계산

1KW급의 소형 발전기는 풍속이 3~4 m/s에서부터 발전을 시작하여 8m/s까지의 구간을 고효율로 발전하고, 대형발전기와는 다르게 20m/s까지는 발전이 가능하다.

연간 풍력에너지생산량(AEP, Annual Energy Production)을 계산하기 위하여 구간별 평균풍속을 구하고, 이를 이용하여 풍력밀도(wind density)를 계산하였다. 풍력밀도는 단위면적당 풍력에너지로(P/A), 정의식은 아래의 식 (1)과 같다.

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

식에서 P , A , ρ 및 V 는 풍력 에너지, 터빈 회전단면적, 공기밀도 및 공기속도를 각각 나타낸다. 생성 에너지는 로터(rotor) 회전면적에 비례하고 풍속의 3제곱에 비례함을 알 수 있다. 그러므로 풍속이 2배가 늘어나면, 단위면적당 풍력에너지밀도는 8배가 늘어나는 것을 알 수 있다.

Table 4 및 5는 10m 및 21m 높이에서의 구간별 풍향 데이터를 이용하여 식 (1)에 의하여 계산된 각 구간별 풍속밀도를 나타낸다. 주풍향인 북북서풍(12번 구간)에서 상대적으로 풍력밀도가 높다.

Table 4 및 5는 블레이드 회전면적을 고려하지 않는 단위 면적에 대한 풍력밀도를 계산한 것으로 발전량은 각 구간별 단위풍속밀도와 블레이드 지름(3m

로 계산)에 대한 회전면적을 고려하여 계산된다. 본 발전량 계산에서는 풍력발전기의 이론적 풍력밀도의 25%를 반영하였다.

이와 같은 과정을 거쳐서 각 구간별 풍력발전량이 계산되고, 구간별 합을 일 년 동안 풍력발전을 통하여 확보할 수 있는 연간 에너지발전량(AEP, Annual Energy Production)으로 하였다.

5.2 풍력발전량 예측

풍력발전량은 풍력밀도를 이용하여 계산하였으며, 블레이드 회전면적을 고려하고 평가하였다.

Fig. 10에 10m 및 21m 높이에서의 구간별 풍속밀도를 이용하여 구한 구간별 연간 에너지발생량을 나타낸다. 연간 에너지발생량은 구간별 평균풍속을 이용하여 결정되며, 식 (1)에서와 같이 에너지는 풍속의 3승에 비례하기에 유속이 큰 주속도 방향에서 상대적으로 큰 에너지발생량을 갖는다. 각각의 설치높이에서의 연간 에너지발생량을 Table 6에 나타낸다.

Table 4 Wind energy density(W) versus 12 sectors at the altitude of 10m

section no.	1	2	3	4	5	6
wind density W/m ²	18.4	9.5	10.1	10.2	9.5	8.2
section no.	7	8	9	10	11	12
wind density W/m ²	12.7	14.7	7.9	8.7	12.0	20.8

Table 5 Wind energy density(W) versus 12 sectors at the altitude of 21m

section no.	1	2	3	4	5	6
wind density W/m ²	29.1	15.2	15.2	15.9	15.1	13.5
section no.	7	8	9	10	11	12
wind density W/m ²	24.4	21.4	10.6	13.4	24.1	47.3

Table 6 Annual energy production

Altitude, m	10	21
AEP, MWh/y	2.02	3.47

Fig. 10 Annual energy production per sections

소형풍력발전기의 설치높이가 높을수록 발전량도 증가하며, 본 계산의 경우 21m 설치의 1kW 풍력발전기가 10m 설치 높이에 비하여 약 1.5배 연간 에너지발생량이 큼을 알 수 있었다. 본 연구에서는 덕적도의 지형특성을 고려하지 않고 풍향 조건만을 반영하여 1kW의 소형풍력발전기를 설치할 경우의 연간 에너지발생량을 평가하였다.

6 결 론

본 연구에서는 인천시 옹진군 덕적도를 대상으로 3년간의 대한민국 바람지도를 이용한 덕적도 풍향 데이터 및 12 방향의 풍향 구간별 풍력밀도 계산을 통하여 1kW 소형풍력발전기의 연간 에너지발생량(annual energy production)을 평가하였으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 2007년 12월부터 1개월간 대한민국 바람지도를 이용한 바람속도는 1kW소형풍력의 설치높이에 해당하는 10m 상공에서 4.9m/s이었으며, 지표면의 점성(viscous)효과의 영향으로 설치높이가 21m 및 72m로 높아질수록 기류속도도 5.9m/s 및 6.4m/s로 상승됨을 알 수 있었다.
- 2) 3년간의 덕적도 풍향데이터를 기반으로 12방향의 바람장미(windrose)를 분석하였으며, 덕적도의 지형위치에서는 북북서방향이 주방향임을 알 수 있었다.
- 3) 주방향인 북북서 방향에서는 10m/s 이상과 4m/s 이하의 낮은 바람이 모두 상대적으로 빈도가 높으며, 이는 주방향방향이 모두 높은 바람성분만 존재하는 것은 아님을 알 수 있었다.
- 4) 해발 21m의 바람측정 높이에서의 12방향 평균풍속의 구간 최고속도는 지면의 점성(viscosity)영향으로 10m 높이의 구간 최대풍속에 비해 31% 증가됨을 알 수 있었다.

- 5) 바람속도의 발생빈도는 설치높이 10m 및 21m의 경우 풍력발전기의 설치높이에 무관하게 3~5m/s 구간에서 가장 큼을 할 수 있었다.
- 6) 풍력밀도를 이용한 1kW 소형풍력발전기의 연간 에너지발생량은 풍력터빈의 설치높이 10m 및 21m에서 각각 2.02MWh/y 및 3.7MWh/y이며, 약 10m 설치고도 상승으로 발전량은 약 1.6배 상승함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 한국건설기술연구원의 주요 사업 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Hyun-Goo Kim, Moon-Seok Jang and Ki-Wahn Ryu, 2013, "Wind Resource Assessment on the Western Offshore of Korea Using MERRA Reanalysis Data," Journal of Wind Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 39-45.
2. Hyun-Goo Kim, Hwa-Un Lee and Woo-Sik Jung, 2005, "A Study on Establishment of a Wind Map of the Korean Peninsula (I. Evaluation of Offshore Wind Resources Using Remote-Sensing Data)," Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 21, No. 1, pp. 63-72.
3. Hyun-Goo Kim, Moon-Seok Jang, Yong-Heack Kang and Kwang-Deuk Kim,, 2010, "National Wind Map Database and Visualization Program," Proceeding of the winter conference of Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 2, pp. 1-3.
4. National Wind Atlas (<http://www.kier-wind.org/>)
5. Technical Report, 2009, "Establishment of High-Resolution Korea Offshore Wind Resource Map and Development of Suitability Assessment System for Offshore Wind Farm Siting," Ministry of Trade, Industry and Energy .
6. Hyun-Goo Kim and Hyo-Jung Hwang, 2010,

“Review on The Proposed Offshore Wind Farm Projects Using National Wind Atlas and National Geographic Information,” Journal of the Korean

Solar Energy Society, Vol. 30, No. 5, pp. 44-55.

7. Report on Eco-Island Project, Incheon City, Korea, 2013.