[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 32, No. 5, 2012
ISSN 1598-6411
http://dx.doi.org/10.7836/kses.2012.32.5.094

녹색섬 풍력자원평가 - 독도

김현구*, 김건훈**, 강용혁***

한국에너지기술연구원 신재생에너지연구본부
*(hyungoo@kier.re.kr), **(kkh4417@kier.re.kr), ***(yhkang@kier.re.kr)

Wind Resource Assessment for Green Island - Dokdo

Kim, Hyun-Goo* Kim, Keon-Hoon** Kang, Young-Heaok***

New & Renewable Energy Research Division, Korea Institute of Energy Research
*(hyungoo@kier.re.kr), **(kkh4417@kier.re.kr), ***(yhkang@kier.re.kr)

Abstract

A Dokdo wind resource map has been drawn up for the Green Island Energy Master Plan according to Korea's national vision for 'Low Carbon Green Growth'. The micro-siting software WindSim v5.1, which is based on Computational Flow Analysis, is used with MERRA reanalysis data as synoptic climatology input data, and sensitivity analysis on turbulence model is accompanied. A wind resource assessment has been conducted for the Dokdo wind power dissemination plan, which consists of two 10kW wind turbines to be installed at the Dongdo dock and Dokdo guard building. It is evaluated that the capacity factors at Dongdo dock and Dokdo guard building are about 20% and 30% respectively, and annual and hourly variations of wind power generation have been analyzed, but summertime energy production is predicted to be only 40% of wintertime energy production.

Keywords : Green island(녹색섬), Dokdo(독도), Wind resource assessment(풍력자원평가), CFA(Computational Flow Analysis; 전산유동해석), WindSim, MERRA(Modern-Era Retrospective Analysis For Research And Applications)

1. 서 론

2012년 8월 10일, 현직 대통령으로는 건국 이후 최초로 독도를 방문한 이명박 대통령은 울릉도와 독도가 친환경적인 녹색섬으로 보존되어야 한다는 현 정부의 녹색정책 의지를 재천명하였다.

울릉도와 독도를 저탄소 녹색성장 국가비전의 종합 실천모델로 조성하고 국제적인 탄소제로 시범도서로 육성하기 위하여 한국에너지기술연구원에서는「녹색섬 조성 종합계획수립 연구」를 수행하였으며,[1] 그 결과로 기술적, 비용적 측면에서 구현 가능한 실질적 녹색섬 에너지계획(안)을 제시한 바 있다.

Submit date : 2012. 8. 17, Judgment date : 2012. 8. 30, Publication decide date : 2012. 10. 26
Communication author : Kim, Hyun-Goo(hyungoo@kier.re.kr)

한국에너지기술연구원의 녹색섬 에너지계획(안)에 의하면, 독도는 풍력설비(20kW), 담수화 설비(8톤/일), 태양광(55kW), 디젤발전기(565kW) 및 배터리(200kWh) 등으로 구성된 에너지공급 시스템을 구성하는 방안이 제시되었다. 독도는 현재 565kW의 디젤 발전기와 2009년 11월 설치된 55kW 태양광 발전설비에 의해 일평균 800kWh의 전기를 발전하여 소비하고 있다.

본 논문은 독도 에너지계획(안)을 수립함에 있어 풍력발전의 도입을 검토하기 위해 실시한 풍력자원평가에 초점을 맞추었다. 즉, MERRA 재해석 기상자료의[2] 동적 축소화(dynamic downscaling)에 의한 전산유동해석으로 국소배치(micrositing)를 위한 풍력자원지도를 작성하고, 10kW급 소형 풍력발전기 2기를 설치할 때 예상되는 풍력발전량 및 시계열 전력생산 특성을 분석하였다.

2. 연구자료

2.1 독도 지형개요

독도는 151m 간격을 두고 마주한 두 개의 큰 섬 서도와 독도 및 89개의 부속 도서로 구성된 화산섬으로, 서도 대한봉과 동도 일출봉의 높이는 각각 해발 168.5m, 98.6m이다. 서도와 동도는 평균 지형경사도 52도의 매우 급한 경사를 이루고 있기 때문에, 국소배치를 위한 풍력자원지도 작성시 지형경사도 12도 이하에서만 유효한 선형 유동모델인 WAsP의 적용이 불가능하므로 필히 전산유동해석을 사용하여야 할 것이다.[3),4)]

2.2 독도 기상개요

독도에는 1996년 자동기상관측장비(AWS; Automatic Weather Station)가 설치되었다가 2009년말에 독도의 지리적, 상징적 의미를 부여하기 위하여 동도에 위치한 독도 경비대 인근에 종관기상관측장비(ASOS; Automated Surface Observing System)를 설치함으로써 본격적인 종관기상관측이 시작되었다.

동도에 설치된 ASOS는 관측장비 주변의 등대, 레이다 시설 및 동도보다 70m 정도 높은 서도 등에 의한 지형지물 차폐영향으로 인하여 관측자료의 왜곡을 피하기 어렵기 때문에, 이를 풍력자원평가에 직접적으로 이용하기에는 많은 제약이 따른다.

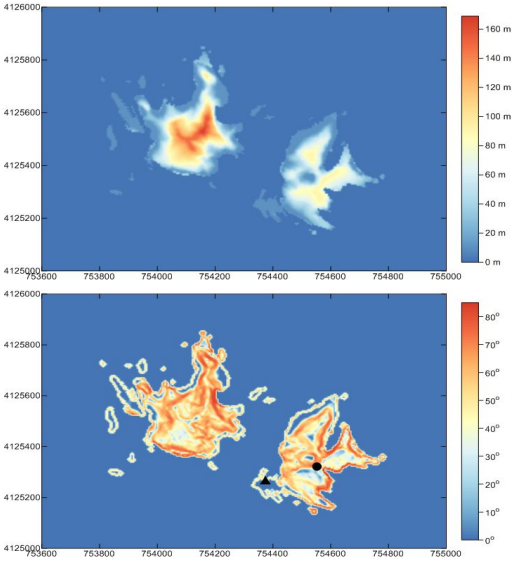


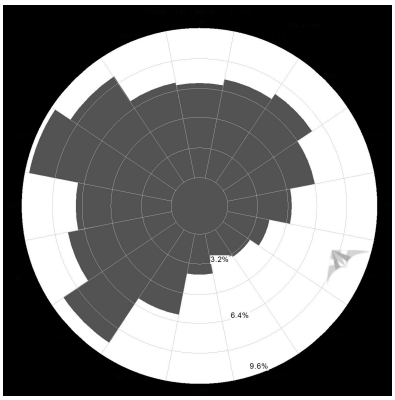
Fig. 1 Dokdo terrain elevation (top) and terrain slope (bottom). (▲: Dongdo Dock, ●: Dokdo Guard)

이에 본 연구에서는 기상관측자료 및 인공위성자료를 GEOS-5 수치기상모델에 자료동화(data assimilation)하여 전지구에 대해 위도 1/2° x 경도 2/3° x 72개 연직층으로 1시간 간격으로 기상요소를 재해석한 미국 NASA의 MERRA 자료를 활용하였다.[2]

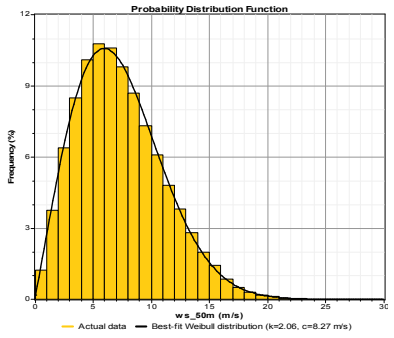
Fig. 2는 독도(37°14'22"N, 131°52'08"E) 최인근(남남서 30km 해상)의 MERRA 격자점(37°N, 132°E)에서 1979년부터 2011년까지의 바람장미 및 풍속의 와이블(Weibull) 분포(k=2.06, c=8.27m/s)로, 해수면 50m 높이에서의 분석자료이다.

Fig. 3은 동도 ASOS가 비교적 지형지물의 간섭영향을 받지 않는 풍향구간인 260~280°에서 2010~2011년 2년간의 공통기간에 대한 MERRA와 ASOS 관측풍속 산포도로, 직선

접합 기울기 1.0, 결정계수(R^2) 0.71의 높은 상관도를 보이고 있다. 따라서 지형지물 차폐영향에 의해 왜곡된 ASOS 관측자료 대신 MERRA 재해석자료를 독도 장기간 풍력자원평가에 활용할 수 있음을 확인하였다.



(a) Wind rose



(b) Weibull distribution of wind speed

Fig. 2 MERRA reanalysis data around Dokdo.

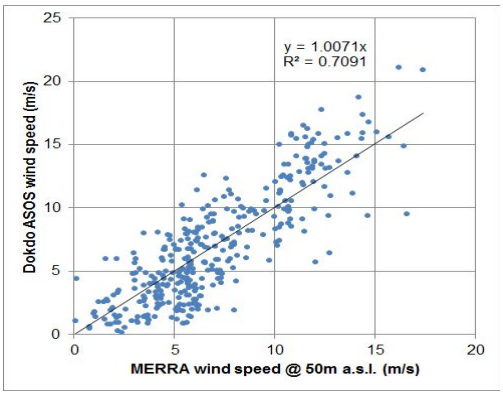


Fig. 3. Wind speed scatter plot of MERRA vs. ASOS.

3. 연구방법

3.1 전산유동해석

급경사 복잡지형인 독도의 풍력자원지도 작성을 위한 유동해석모델로 전산유동해석 모듈인 PHOENICS 기반의 WindSim v5.1을 사용하였으며,[5] 1979년부터 2011년까지 33년간 1시간 간격의 MERRA 재해석자료를 동적 축소화를 위한 기상자료(climatology)로 입력하였다.

독도 전산유동해석을 위한 수치계산 격자계는 독도에 의한 후류영역이 계산영역 내에 포함될 수 있도록 구성하였다. 또한 독도의 수평면 격자간격은 격자계 의존성 사전분석을 통하여 5m로 설정하였는데, 이는 지형고도 입력자료로 사용한 독도 DEM(Digital Elevation Model)의 해상도와 동일하다. 단, 지형경사도의 급격한 변화로 인한 수치해의 발산을 억제하기 위하여 직교(orthogonal) 격자를 채택하고 지형경사도 구배를 0.05 이하로 제한하였다.

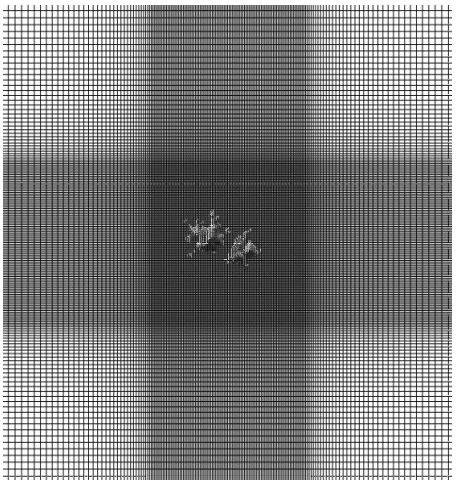


Fig. 4 Computational grid around Dokdo (172x172x25).

급경사 복잡지형에서는 풍속구배의 급격한 변화 및 유동박리 등이 수반되므로 정확한 대기유동 수치모의에 있어서 난류모델의 선정은 중요한 관건이다.[6]

독도 대기유동장 수치모의에 적합한 난류모델 선정을 위해 WindSim에서 제공하는 표준 $k-\varepsilon$, 수정상수 $k-\varepsilon$[7], RNG $k-\varepsilon$, YAP $k-\varepsilon$[8] 및 $k-\omega$ 난류모델 간의 오차분석을 수행하였다. 이 중 YAP $k-\varepsilon$ 및 $k-\omega$ 난류모델은 수치해가 발산하였기 때문에 나머지 세 가지 난류모델에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 수렴성 향상을 위해 GCV(General Collocated Velocity) 알고리듬을 사용하였다.[9]

3.2 풍력자원평가

한국에너지기술연구원의 녹색섬 에너지계획(안)에서는 독도 풍력발전기 설치위치를 2008년도 산업자원부(현 지식경제부)의 독도 풍력발전 도입방안에서 검토되었던 동도 선착장과 독도 경비대의 두 위치(Fig. 1)에 국한하였으며, 설치용량도 10kW급 소형 풍력발전기 2기로 한정하였다. 이러한 보수적 계획안의 중요한 배경은 풍력발전기 소음에 의한 천연기념물 조류 등에 대한 환경피해를 배제하기 위함이다.

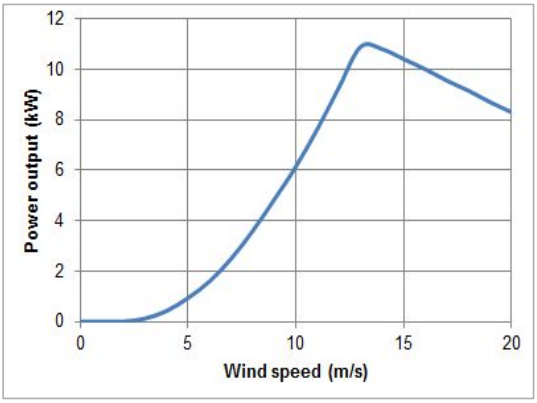


Fig. 5 Power curve of Bergey Excel-S wind turbine.

본 연구에서는 동도 선착장 및 독도 경비대에 10kW급 소형 풍력발전기 총 2기를 설치하는 설계안에 대하여 독도 풍력자원평가를 수행하였다. 소형 풍력발전기로는 한국에너지기술연구원에서 남극 세종기지에 직접 설치하여 디젤-풍력 복합발전 실증연구에 사용한[10] Bergey Windpower Co.의 Bergey Excel-S를 선정하였다. 이 기종은 날개직경은 6.7m, 설치높이는 지상 18m이며 성능곡선(power curve)은 Fig. 5와 같다. 현재 다양한 형식의 소형 풍력발전기가 출시되었지만, 성능평가를 통하여 검증된 사례는 흔하지 않으며, 더욱이 남극과 같은 극한환경에서 실증된 경우는 매우 드물다.

4. 연구결과

4.1 난류모델평가

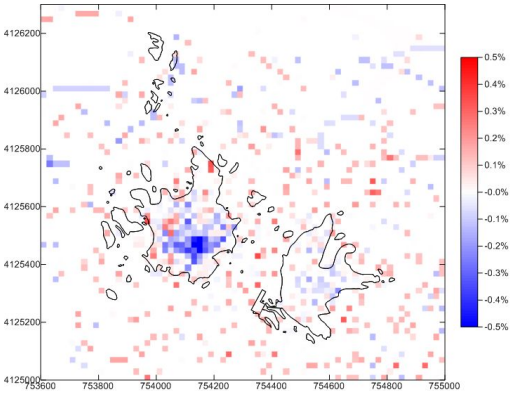
급경사 복잡지형인 독도의 대기유동장 수치모의에 적합한 난류모델을 선정하기 위한 비교분석을 수행하였다. 그 결과로서 난류모델에 따른 평균풍속 예측값의 차이를 Fig. 6과 같이 상대비율로 제시하였다.

평균풍속 상대차이 V_R은 다음과 같이 정의하였는데, 유동박리를 수반하는 대기유동장 해석에서 높은 신뢰도를 보인[6] RNG $k-\varepsilon$ 난류모델을 기준으로 정하였다.

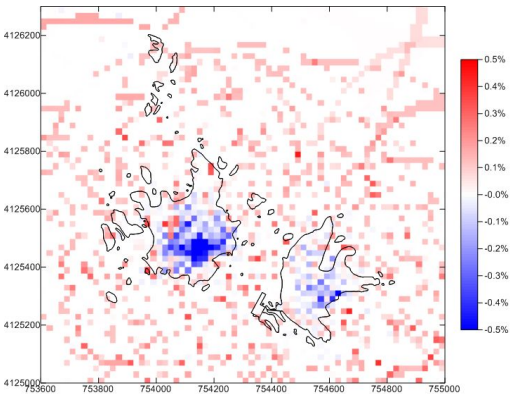
$$V_R = \frac{V_{MODEL} - V_{REF}}{V_{REF}} \times 100\,(\%) \qquad (1)$$

식에서 V_{MODEL}은 비교대상 난류모델에 의한 계산영역 임의지점에서의 평균풍속이며 V_{REF}는 기준인 RNG $k-\varepsilon$ 난류모델에 의해 예측된 평균풍속이다.

Fig. 6을 보면 RNG $k-\varepsilon$ 대비 표준 $k-\varepsilon$ 및 수정상수 $k-\varepsilon$ 난류모델 해석결과의 차이는 지형경사도 구배가 가장 큰 서도 대한봉 위치에서 0.5% 내외로 풍속을 낮게 예측하는 정도의 미약한 차이만 발견된다. 따라서 독도 주위 대기유동장 수치모의에 있어서 난류모델에 따른 민감도는 무시할 수 있다고 판정하였다.

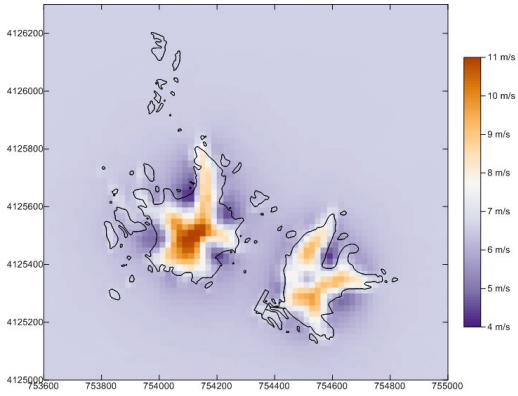


(a) Standard $k-\varepsilon$ vs. RNG $k-\varepsilon$ turbulence model

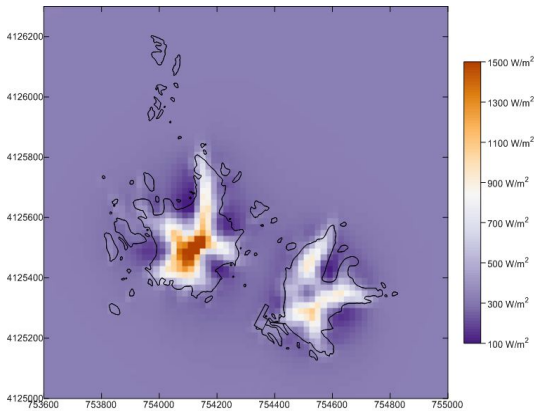


(a) Modified constnat $k-\varepsilon$ vs. RNG $k-\varepsilon$ turbulence model

Fig. 6 Mean wind speed difference predicted by the different turbulence models.



(a) Mean wind speed distribution



(b) Mean wind power density distribution

Fig. 7 Dokdo wind resource map (spatial resolution of 5m, at 18m above ground/sea level).

4.2 풍력자원지도

Fig. 7은 전산유동해석에 의해 작성된 독도 풍력자원지도로, 소형 풍력발전기의 설치높이인 지상 18m에서의 풍력자원 공간분포를 보여주고 있다. 즉, Fig. 7 (a)와 (b)는 각각 1시간 평균에 의한 33시간 평균풍속 및 평균풍력밀도 분포도이다.

독도 풍력자원지도를 보면, 서도가 동도로 향하는 서풍계열 주풍향을 차단하고 있기 때문에 서도에 비하여 동도가 상대적으로 저풍속으로 나타나고 있으며, 동도 서단의 선착장은 Fig. 2(a)에 도시된 주풍향의 대부분이 서도에 의해 차단되어 독도 경비대에 비하여 풍력자원은 현저히 낮을 것으로 판단된다.

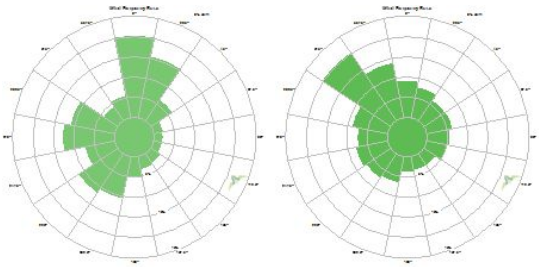


Fig. 8 Wind roses at Dongdo Dock (left) and Dokdo Guard Building (right).

동도 선착장 위치에 대하여 수치모의된 바람장미를 살펴보면, 선착장 위치는 서도와 동도에 의해 서풍과 동풍이 차단되지만 남북으로 바람길이 형성되는 풍계특성을 잘 반영

하고 있다(Fig. 8). 반면 독도 경비대 위치에서의 주풍향은 북서풍이 탁월하게 나타나고 있다.

서도 대한봉과 동도 일출봉에서의 평균풍속은 각각 11.1m/s, 9.2m/s이고 평균풍력밀도는 각각 1687W/m^2, 911W/m^{2}으로 매우 우수한 풍력자원을 가지고 있는 것으로 분석되었다.

4.3 풍력자원평가

Bergey Excel-S 10kW 풍력발전기 2기를 각각 동도 선착장과 독도 경비대에 설치하는 보급방안에 대한 풍력자원평가를 수행하였으며, 그 결과를 Table 1과 2에 가동률(availability) 100%, 무손실인 경우의 이론적 풍력발전량 통계로 제시하였다.

동도 선착장에서의 평균풍속은 6.8m/s이며 전술한 바와 같이 서도(30^o~120^o)와 동도(210^o~300^o)의 차폐영향이 남북 통로(330^o~0^o, 150^o~180^o)에 의한 벤츄리(Venturi) 가속효과보다 크기 때문에 자연풍 대비 7%의 풍속 감속이 발생하는 것으로 예측되었다. 반면 독도 경비대에서의 평균풍속은 8.85m/s이며 동도의 정상부에 위치하고 있기 때문에 자연풍 대비 21%의 풍속 가속이 발생하는 것으로 예측되었다.

가동률 90%, 손실률 10%를 가정할 경우 동도 선착장 및 경비대에서의 연간에너지생산량(AEP; Annual Energy Production)은 각각 21.8MWh/y, 31.9MWh/y이고 설비이용률(capacity factor)은 각각 20%, 30%인 것으로 평가되었다.

독도 에너지계획(안)을 수립함에 있어서 중요한 것은 연간에너지생산량의 예측뿐만 아니라, 실질적으로 디젤-풍력 복합발전에 의한 전력수급 측면에서 풍력발전량 시계열 특성의 정확한 파악이 필요하다. Fig. 9는 연도별, 월별 그리고 시간별 평균풍속 및 풍력발전량 시계열 특성을 분석한 그래프이다.

Table 1 Wind power generation statistics from the wind turbine installed at Dongdo Dock.

Wind direction sector (deg.)	Annual energy prod. MWh/y	Freq. of occurr-ence	Wind speed ref (m/s)	Wind speed wecs (m/s)	Speedup ratio
0	3.2	0.09	7.59	7.86	1.04
30	2.9	0.1	7.45	7.15	0.96
60	1.6	0.09	6.73	5.75	0.85
90	0.7	0.07	5.71	4.68	0.82
120	0.5	0.05	5.14	4.58	0.89
150	0.7	0.04	5.23	5.29	1.01
180	1	0.05	5.69	5.93	1.04
210	2.8	0.1	7.43	7.18	0.97
240	2.6	0.11	7.72	6.56	0.85
270	2.2	0.09	7.89	6.48	0.82
300	5.3	0.13	9.24	8.49	0.92
330	3.6	0.09	8	8.21	1.03
Total	27.1	1	7.33	6.8	0.93

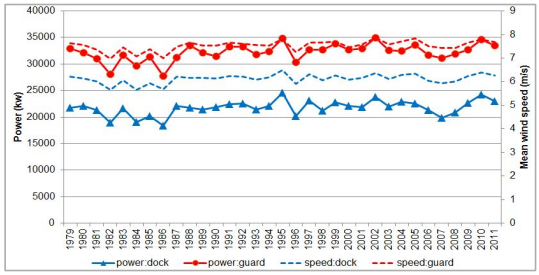
Table 2 Wind power generation statistics from the wind turbine installed at Dokdo Guard Building.

Wind direction sector (deg.)	Annual energy prod. MWh/y	Freq. of occurr-ence	Wind speed ref (m/s)	Wind speed wecs (m/s)	Speedup ratio
0	3.9	0.09	7.59	9.2	1.21
30	3.5	0.1	7.45	8.08	1.08
60	2.7	0.09	6.73	7.29	1.08
90	1.9	0.07	5.71	7.07	1.24
120	1.3	0.05	5.14	7.02	1.37
150	1.1	0.04	5.23	7.25	1.39
180	1.4	0.05	5.69	7.4	1.3
210	3.1	0.1	7.43	7.76	1.04
240	3.6	0.11	7.72	7.71	1
270	4	0.09	7.89	9.84	1.25
300	6.6	0.13	9.24	12.65	1.37
330	4.6	0.09	8	10.78	1.35
Total	38	1	7.33	8.85	1.21

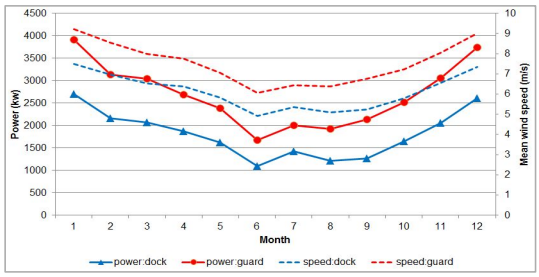
독도의 연도별 풍력발전량을 도시한 Fig. 9 (a)를 보면 그 변화량이 6% 이내로 크지 않은 것으로 나타났다. 일반적으로 풍력발전량의 경년변화에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 태풍인데, 동해 중심에 위치한 독도는 태풍의 상부진로를 한반도와 일본열도가 차단하고 있어 상대적으로 독도에 미치는 태풍은 그 세

력이 대폭 약화됨에 따라[11] 풍력자원의 연도 변화가 작은 것으로 판단된다. 하지만 한반도 전체가 몬순(Monsoon) 기후대에 속하기 때문에 Fig. 9 (b)와 같이 계절별 풍력자원의 변동성은 매우 크게 나타난다. 즉 하계로 접어드는 6월의 풍력발전량은 동계인 1월의 40% 수준일 것으로 분석되었다.

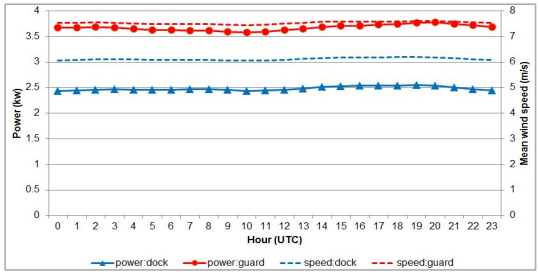
Fig. 9 (c)의 풍력발전량 일변화 특성을 보면, 독도는 해양성 기후가 지배적이기 때문에 일변화가 거의 없이 일정한 풍력발전량을 유지하고 있어 전력수급 측면에서는 매우 유리한 상황으로 판단된다.



(a) Annual wind speed and power generation



(b) Monthly wind speed and power generation



(c) Hourly wind speed and power generation

Fig. 9 Time-series pattern of wind speed and power generation (▲: Dongdo Dock, ●: Dokdo Guard).

5. 결 론

녹색섬 에너지계획을 수립하기 위하여 전산유동해석을 수행하여 독도 풍력자원지도를 작성하였으며, 10kW 소형 풍력발전기 2기를 동도 선착장과 경비대에 설치하는 풍력발전 도입방안에 대한 풍력자원평가를 수행하였다.

본 논문을 통하여 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 전산유동해석 기반의 국소배치 소프트웨어인 WindSim v5.1과 종관기상 입력자료로서 MERRA 재해석자료를 사용하여 독도 풍력자원지도를 작성하였다. 풍력자원지도의 공간해상도는 5m이며 시간해상도는 1시간 간격으로, 총 33년간의 시계열 자료로 구성된다.

(2) 급경사 복잡지형의 대기유동장 수치모의 시 난류모델 선정에 따른 민감도 평가를 할 필요가 있다. 급경사 복잡지형에서는 일반적으로 난류모델에 따라 예측결과에 상당한 차이가 발생하지만, 본 연구에서는 예상과는 달리 표준 $k-\varepsilon$, 수정상수 $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ 난류모델 간의 차이가 매우 미미한 것으로 분석되었으며, 이에 난류모델 불확도는 무시할 수 있다고 판정하였다.

(3) 10kW 소형 풍력발전기 2기를 동도 선착장과 독도 경비대에 설치할 경우 예상되는 풍력발전량의 연도별, 월별, 시간별 시계열 변화특성을 분석하였다. 경년변화와 일변화가 거의 없어 안정적 전력공급이 가능할 것으로 기대되지만, 하계에는 풍력발전량이 크게 저하될 것으로 분석하였다.

본 논문에서는 매우 보수적인 풍력발전 보급방안에 대한 풍력자원평가를 수행하였다. 그러나 국내 최초로 완성된 독도 풍력자원지도를 이용하여, 향후 다양한 독도 풍력발전 보급방안에 대한 기술적 검토 및 설계가 가능

하게 되었다는 점에서 본 연구에 시의적 의미를 부여할 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 「신재생에너지 자원지도 및 활용시스템 구축사업(B2-2441)」 및 지식경제부 「녹색섬 조성 종합계획수립 연구(B1-4301)」의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Korea Institute of Energy Research, Study on Comprehensive Establishment Planning for Ulleungdo Green Island, Ministry of Economy Knowledge, Technology Innovation Project, 2012-02.
2. Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., Kim, G.K., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., A. da Silva, Gu, W., Joiner, J., Koster, R.D., Lucchesi R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P., Redder, C.R., Reichle, R., Robertson, F.R., Ruddick, A.G., Sienkiewicz, M., Woollen, J., MERRA - NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, J. Climate, Vol. 24, pp. 3624-3648, 2011.
3. Kim, S.W. and Kim, H.G., Wind Resource Assessment of the Antarctic King Sejong Station by Computational Flow Analysis, J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, pp. 29-36, 2007.
4. Kim, S.W. and Kim, H.G., Sensitivity Analysis of Wind Resource Micrositing at the Antarctic King Sejong Station, J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 4, pp. 1-9, 2007.
5. WindSim AS, Gettting Started WindSim 5, WindSim, 84p.
6. Kim, H.G., Patel, V.C., Test of Turbulence Models for Wind Flow over Terrain with Separation and Recirculation, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 94, No. 1, pp. 5-21, 2000.
7. Duynkerke, P.G., Application of the $k-\varepsilon$ Turbulence Closure Model to the Neutral and Stable Atmospheric Boundary Layer, J. Atmos. Sci., Vol. 45, pp. 865-880, 1988.
8. Yap, C.J, Turbulent Heat and Momentum Transfer in Recirculating and Impinging Flows, PhD Thesis, Faculty of Technology, University of Manchester, UK, 1987.
9. Poliakov, I.N., Semin, V.A., Development and Evaluation of New Linear Equation Solvers for PHOENICS, The PHOENICS J. Comput. Fluid Dynam. Appl., Vol. 7, No. 1, pp. 34 - 57, 1994.
10. Kim, S.W. and Kyong, N.H., Demonstration of 10kW Wind Turbine System at the King Sejong Station, J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 4, pp. 25-30, 2006.
11. Park, J.K., Kim, B.S., Jung, W.S., Kim, E.B., Lee, D.G., Change in Statistical Characteristics of Typhoon Affecting the Korean Peninsula, Atmosphere, Vol. 16, No. 1, pp. 1-17, 2006.