

MERRA 재해석 데이터를 이용한 중국 동하이대교 풍력단지 에너지발전량 예측

Prediction of Energy Production of China Donghai Bridge Wind Farm Using MERRA Reanalysis Data

고월* · 김병수* · 이중혁* · 백인수** · 유능수**

Gao Yue*, Kim Byoung-su*, Lee Joong-Hyeok*, Paek In-su**†, Yoo Neung-Soo**

(Received 12 January 2015; accepted 22 June 2015)

Abstract : The MERRA reanalysis data provided online by NASA was applied to predict the monthly energy productions of Donghai Bridge Offshore wind farms in China. WindPRO and WindSim that are commercial software for wind farm design and energy prediction were used. For topography and roughness map, the contour line data from SRTM combined with roughness information were made and used. Predictions were made for 11 months from July, 2010 to May, 2011, and the results were compared with the actual electricity energy production presented in the CDM(Clean Development Mechanism) monitoring report of the wind farm. The results from the prediction programs were close to the actual electricity energy productions and the errors were within 4%.

Key Words : 중국 동하이대교 해상풍력단지(Offshore wind farm), MERRA 재해석 자료(Modern Era Retrospective - Analysis for Research and Applications Reanalysis Data), 에너지 생산량(energy production)

1. 서 론

세계 해상풍력 총 설비용량은 2013년 현재 약

7GW로 매년 끊임없는 증가추세에 있다.¹⁾ 육상 풍력발전단지의 주민 수용성 및 인허가와 관련된 문제들과 유망한 설치지역이 점차 포화되는

**† 백인수(교신저자) : 강원대학교 기계메카트로닉스공학과
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-250-6379
*고 월 : 강원대학교 융합시스템공학과
*김병수 : 강원대학교 융합시스템공학과
*이중혁 : 강원대학교 융합시스템공학과
**유능수 : 강원대학교 기계메카트로닉스공전공학과

**† Paek In-Su(corresponding author) : Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University.
E-mail : paek@kangwon.ac.kr, Tel : 033-250-6379
*Gao Yue : Department of Convergence System Engineering, Kangwon National University.
*Kim Byoung-Su : Department of Convergence System Engineering, Kangwon National University.
*Lee Joong-Hyeok : Department of Convergence System Engineering, Kangwon National University.
**Yoo Neung-Soo : Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University.

문제로 인해 해상풍력발전단지의 설치는 앞으로 점점 증가할 것으로 예상되고 있다. 풍력발전단지 조성을 위해서는 바람자원이 풍부한 지역을 선정하고 선정된 지역에 기상관측타워를 설치하여 풍력자원을 측정 한 후, 발전단지가 건설된 이후에 생산할 수 있는 연간 발전량을 예측하는 과정이 필수적이다. 이와 같은 과정이 비교적 수월한 육상 풍력발전단지에 비해 해상풍력발전단지의 경우에는 기상관측타워가 해상에 설치되어야 하기 때문에 해상기초구조물을 포함하는 기상관측타워 제작과 설치에 많은 시간과 비용이 발생하게 된다. 따라서, 기상관측타워를 설치하기에 앞서 풍력발전단지 유망후보지를 선정하는 작업이 매우 중요하며, 이를 위해 장기간에 걸쳐 가용할 수 있는 자료가 있는 MERRA 재해석 데이터를 활용한 풍력자원 예측에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 김현구 등³⁾은 독도에 대한 풍력자원 평가를 위해 MERRA 재해석 자료를 활용하였으며, 권일한 등⁴⁾은 국내 해상풍력발전단지 설치 적합지역을 선정하고 기상관측자료(Met. mast data)와 MERRA 재해석 데이터를 이용하여 해상풍력자원을 예측한 연구를 수행한 바 있다. 또한 김진한 등⁵⁾은 국내 육상풍력발전단지의 연간 발전량 예측을 위해 MERRA 재해석 자료를 적용하고 이를 실측결과와 비교하여, MERRA 재해석 자료의 육상풍력발전단지 연간 발전량 예측 적용가능성을 제시하였다. 해상풍력발전단지 발전량 예측에 대한 연구로 송원 등⁶⁾은 MERRA 재해석 자료를 덴마크 미들그룬덴 풍력발전단지에 적용하여 비교적 정확한 발전량 예측이 가능한 것을 보였다. 이와 같이 육, 해상 풍력자원 예측 및 발전량 예측을 위해 MERRA 재해석 데이터를 적용한 연구들이 수행되고 있다. 하지만, 연구결과가 많지 않고 특히 해상풍력발전단지에 대한 발전량 예측 연구 결과는 주 풍방향에 대해 수직인 일렬로 배치된 소형 풍력

발전단지에 대한 예측 결과로서 현존하는 100 MW 이상의 대형 풍력발전단지에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 비교적 대용량인 100MW 이상의 해상풍력발전단지의 발전량 예측을 위해 MERRA 재해석 데이터의 적용가능성을 알아보고자 수행하였다. 다만 본 연구에서의 MERRA 재해석 자료를 이용한 풍력발전단지 예측 연구는 해상기상관측 타워의 설치 없이 발전단지를 건설하기 위한 목적에서의 발전량 예측이 아니며, 발전량 예측의 정확성을 알아본 후 이를 통해 해상기상관측타워 설치 이전에 대략적인 발전량 산정 및 경제성 분석을 수행하여, 유망후보지를 선정하고 기상관측타워를 설치하여 단지개발을 추진할 수 있는 판단에 활용하기 위함이다. 이를 위해 본 연구에서는 중국 동하이대교 풍력발전단지(China Donghai Bridge Wind Farm)를 대상으로 해당지역의 기상관측타워로부터 측정된 풍황데이터가 없는 상황에서 MERRA(Modern Era Retrospective - Analysis for Research and Applications) 재해석 데이터만을 이용하여 해상풍력발전단지의 월별 및 연간 발전량을 예측하였다. 이를 위해 상용 풍력시뮬레이션 프로그램인 WindPRO와 WindSim을 이용하여 중국 동풍력단지를 모델링 하고 MERRA 데이터를 적용하여 생산 가능한 월별 발전량을 예측하였다. 이를 CDM 보고서⁷⁾에 제시되어 있는 월간 실측 발전량과 비교하여 MERRA 재해석 데이터의 적용 타당성을 조사하였다.

2. 연구 내용

2.1 중국동하이대교 해상풍력단지 현황

동하이대교 풍력단지는 중국의 최대규모 상용 해상풍력발전단지이다. 동하이대교 풍력단지는 그림 1과 같이 동하이대교 동쪽해상 동경

30.770°, 북위 121.994° 위치하고 있으며, 14km²의 면적을 차지하고 있다. 또한 평균수심이 약 7m로, 비교적 낮은 수심에 설치되어 있으며, 2010년 6월 준공되어 가동되고 있다. 단지는 Sinovel사의 3MW급 SL3000/90 모델 34기로 구성되어 있으며, 풍력터빈의 로터지름은 90m, 허브높이는 91m이다.



Fig. 1 Location of Donghai Bridge Wind Farm

중국 동하이 대교 풍력단지의 규모는 102MW로 연간 약 7만 2000가구에 전력을 공급할 수 있으며, 5만 대의 차량의 연간 이산화탄소 배출량에 해당하는 146,000톤을 감소시키는 효과를 갖는 것으로 알려져 있다.⁸⁾

Table. 1 Informations of SL3000/90

	Rated Power	3000kW
	Rotor diameter	90m
	Swept Area	6,362m ²
	Cut in wind speed	3 m/s
	Rated wind speed	13 m/s
	Cut-out wind speed	25 m/s

동하이 대교 풍력발전단지에 설치된 SL3000/90 풍력터빈 모델의 출력곡선(Power Curve)이

표 1에 제시되어 있다. 표에서 알 수 있듯이 동하이대교 풍력단지에 적용된 풍력터빈의 시동풍속은 3m/s, 정격풍속은 13m/s, 중단풍속 25m/s이다.⁹⁾

2.2 발전단지 모델링

발전단지를 포함하는 인근 지형을 모델링하기 위해 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 90m 등고선을 갖는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 90m Resolution) 수치고도 모델(Digital Elevation Models, DEM)을 이용하였다. 지표 거칠기의 자료는 구글어스 (Google Earth) 위성지도를 활용하였으며, 지형정보와 지표거칠기 정보를 담게되는 지형모델은 상용 지리정보시스템 (GIS: Geographic Information System) 프로그램을 사용하여 제작하였다. 해상풍력발전단지 이지만 인근 지형에 의한 유동의 영향을 시뮬레이션하기 위해 풍력단지와 인근 육지영역을 포함하는 40km×40km의 비교적 넓은 영역에 대한 지형정보와 지표 거칠기 정보를 입력하여 모델링을 수행하였다.

2.3 MERRA 재해석 데이터

MERRA 재해석 자료는 미국 NASA에서 제공하는 자료로서 인공위성 자료와 다양한 기상관측자료 등을 GEOS-5(the Goddard Earth Observing System Data Assimilation System Version 5) 기상모델의 대기 자료동화시스템 (Atmospheric Data Assimilation System)에 적용하여 시계열로 제작되는 재해석 자료이다. 본 연구에서는 해상도 50m 높이에서 1시간 간격의 MERRA 재해석 데이터를 사용하였다. 풍력발전단지 실측 월간발전량과 예측 월간발전량 비교를 위해 실측 자료가 존재하는 기간과 동일하게 2010년 7월부터 2011년 5

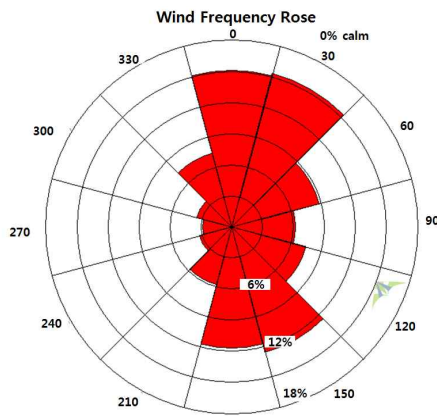
월까지 총 11개월의 MERRA 데이터를 사용하였으며, 풍속 및 풍향 값을 WindPRO 및 WindSim 프로그램에 각각 입력하였다. 풍력단지에서 가장 가까운 MERRA 재해석 데이터 지점은 그림 2에 제시된 바와 같이 단지 중심으로부터 약 25km 떨어진 지점이며, 이는 Measnet에서 권장하는 풍력자원 예측을 위한 단순지형의 기상관측타워와 풍력터빈의 최대이격거리인 10km를 초과하는 지점이지만, 보다 근접한 데이터가 없어, 본 데이터를 적용하였다.



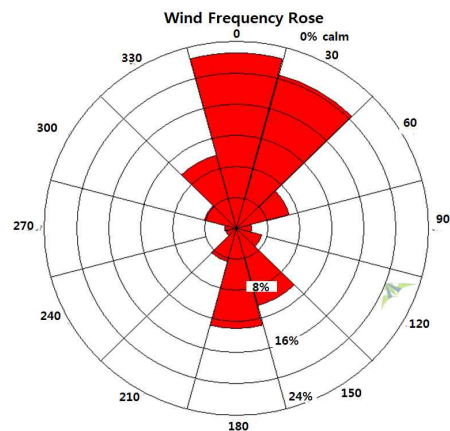
Fig. 2 Distance between Donghai Bridge Wind Farm and MERRA

그림 3은 적용된 MERRA 재해석 데이터의 바람장미와 에너지장미를 각각 나타낸다. (a)는 방위별 빈도수를 나타내며, (b)는 에너지 밀도를 나타낸다. 방위별 빈도수는 30°에서 우세하게 나타났으며, 에너지 밀도도 0°에서 우세하게 나타났다. 그림으로부터 동하이 대교 풍력발전단지의 주풍방향은 북풍이며, 대부분의 에너지가 북풍 또는 남풍에 포함되어 있어, 발전단지에 동하이대교의 영향은 미미

할 것으로 판단하고, 풍력자원 해석에서 동하이 대교에 대한 모델링은 배제하고 해석을 진행하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Analysis of Wind Data(%). (a): Wind Rose(%)
(b): Energy Rose(%)

표 2는 각 해석프로그램에 적용한 MERRA 재해석 데이터의 결과를 각각 나타낸다. MERRA 재해석 데이터를 WindPRO, WindSim에서 와이블 함수로 변환한 결과인 와이블 형상계수 (Shape factor), k 와 척도계수 (Scale factor), c 는 각각 프로그램의 수치해석 기법에 의해 약간

의 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 발전량 비교를 위해, 공기밀도는 동하이 풍력단지의 연평균 공기밀도의 값으로서 1.224 kg/m³의 동일한 값을 적용하였다.

Table. 2 MERRA reanalysis data

		WindPRO	WindSim
Mean Wind Speed (m/s)		6.43	
Weibull Parameter	k	2.53	2.55
	c(m/s)	7.33	7.34
Air Density (kg/m ³)		1.224	

2.4 발전량 예측 프로그램

동하이 대교 풍력발전단지 월별발전량과 예측 월별발전량 비교하기 위해서 덴마크의 EMD사에서 개발한 WindPRO 2.8¹⁰⁾ 프로그램과 노르웨이 WindSim AS에서 개발된 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 프로그램인 WindSim v6.0^{11,12)}을 사용하였다.

(1) WindPRO

WindPRO는 선형 유동모델 기반의 WAsP¹³⁾을 Solver로 사용하는 프로그램으로서, 풍속 및 에너지발전량 예측과정 또한 WAsP과 동일하다. WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)는 1987년 덴마크의 Risø 국립연구소(DTU 풍력 에너지) 개발한 풍력 자원분석 및 평가 프로그램이다. WAsP은 대기경계층(Atmospheric Boundary Layer)내의 대기유동의 원리에 기초를 두고 있는 여러 변환모델들에 의해 한 지점에서 측정된 풍황 데이터를 수직 및 수평 방향으로 적용시켜 원하는 지점의 풍황을 예측한다. 하지만, WAsP에 적용된 유동모델이 유동박리, 와류와 같은 비선형 유동을 예측할 수 없는 단순모델이기 때문에 복잡지형에 적용하는데 한계가 따른다는 연구결과가

제시되고 있다. 본 연구에서는 WindPRO를 이용한 연간발전량 예측의 경우, N. O Jensen(EMD, 2005)¹⁴⁾ 후류 모델 및 S. Frandsen(1999) 난류 모델을 이용하였다. WindPRO 모델은 그림 4와 같다.



Fig. 4 WindPRO modeling

(2) WindSim

WindSim은 비선형 유동장 해석이 가능한 프로그램으로서 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation)를 이용하여 3차원 유동장을 해석하는 프로그램이다. WindSim은 Terrain, Wind Field, Object, Result, Wind Resource, Energy 총 6개 모듈로 구성된다. 본 연구에서는 WindSim으로 연간발전량을 예측하는 경우 N. O Jensen 후류 모델을 사용하여 표준 k-ε 난류 모델을 이용하였다. Fig. 5와 같이 연구한 풍력발전단지의 해석영역 모두 40km × 40km로 설정하였으며, 격자 생성 결과는 표 3에 정리하였다. 표 4는 고도에 따른 격자길이 분포를 나타낸다. 수평축(x, y)격자 간격은 100m로 균일하게 분할되어 있으며, 수직축(z)은 낮은 고도에서 해석의 정확도를

높이기 위해 고도가 낮아질수록 격자간격이 좁아지도록 설정하였다.

Table. 3 The results of MESH Generation in WIndSim

Grid spacing(m)	x	y	z	Total
Number of cells	400	400	40	6,400,000

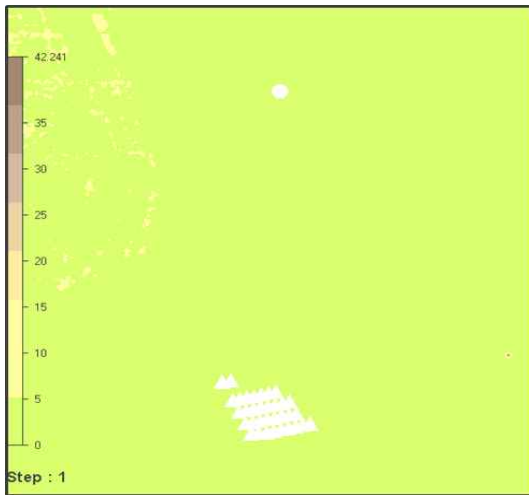


Fig. 5 WindSim modeling

Table. 4 Results of Height Distribution Factor in WindSim

	z-dist, min (m)	z-dist, max (m)
1	3.5	3.3
2	11.0	10.3
3	19.2	18.0
4	28.1	26.4
5	37.7	25.5
6	48.1	45.2
7	59.2	55.6
8	71.0	66.8
9	83.2	78.5
10	96.8	91.0

3. 연구 결과

CDM 보고서에서 공개된 발전량 자료가 2010년 7월 ~ 2011년 5월 까지의 11개월에 대한 자

료로 국한되어있어 11개월 발전량과 WindPRO와 WindSim 예측결과를 비교하였다. 결과에서 CDM 보고서에서 제시된 발전량은 동하이 대교 풍력발전단지 내에 위치한 전력망계에 의해 측정된 값으로, 발전단지에서 외부 변전소까지의 송전 손실이 고려되지 않은 발전량이다. 발전단지의 월별가동률은 공개되지 않아, 문헌상에 연구결과로 제시된 연간 평균 풍력발전단지 가동률인 96.1%를 WindPRO과 WindSim의 11개월 발전량 예측결과에 적용하였다¹⁵⁾.

표 5와 표 6은 WindPRO와 WinSim 월별예측발전량과 CDM 결과 보고서에 있는 동하이 대교 풍력발전단지의 월별실측발전량을 각각 비교한 것이다. 월간 발전량 예측결과, 두 해석 프로그램 모두 8월에서 12월 사이에 낮은 오차율을 보인 반면 2010년 7월 및 2011년 1월 ~ 5월 사이에서 높은 오차율을 보였다. 이는 동하이대교 해상풍력단지 인근 MERRA 데이터와 실제 풍향 간의 오차와 함께 본 논문에서 적용한 연평균 가동률 96.1%와 실제 풍력터빈간 월간 가동률의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다.

Table. 5 electricity energy production predicted by WindPRO

시간 (월)	실측 (MWh)	예측 100% (MWh)	예측 96.1% (MWh)	오차율
7	10,720	15,429	14,827	38.3%
8	12,216	12,556	12,066	-1.2%
9	15,214	15,832	15,215	0.0%
10	22,519	25,262	24,277	7.8%
11	9,726	10,172	9,775	0.5%
12	25,980	28,211	27,111	4.4%
1	19,903	19,756	18,986	-4.6%
2	15,265	12,620	12,128	-20.6%
3	17,966	14,421	13,859	-22.9%
4	19,361	18,232	17,521	-9.5%
5	19,202	17,947	17,247	-10.2%
합계	188,071	190,438	183,011	-2.7%

Table. 6 Electricity Energy Production Predicted by WindSim

시간 (월)	실측 (MWh)	예측 100% (MWh)	예측 96.1% (MWh)	오차율
7	10,720	14,053	13,505	26.0%
8	12,216	11,725	11,268	-7.8%
9	15,214	16,097	15,469	1.7%
10	22,519	26,335	25,308	12.4%
11	9,726	11,234	10,796	11.0%
12	25,980	29,435	28,287	8.9%
1	19,903	21,907	21,053	5.8%
2	15,265	14,012	13,466	-11.8%
3	17,966	15,289	14,693	-18.2%
4	19,361	18,515	17,793	-8.1%
5	19,202	17,724	17,033	-11.3%
합계	188,071	196,326	188,669	0.3%

월별 오차율이 큰 반면, 11개월 전체에 대한 예측오차는 WindPRO와 WindSim 프로그램이 각각 -2.7%, 0.3%로 실측 발전량과 매우 유사한 결과를 보여주었다. 이는 본 연구에서와 같이 연간 발전량 또는 이에 준하는 발전량에 평균 가동률을 적용할 경우 연간발전량 예측은 유사하게 예측될 수 있는 반면, 월간 가동률은 연평균 가동률과는 달리 월별로 크게 차이가 발생할 수 있기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 MERRA 재해석 데이터를 이용하여, 연간 해상 풍력발전단지 발전량을 예측하는 경우 정확한 월간 가동률을 알 수 없기 때문에 월간 발전량 예측은 적용하기 어려우며, 연평균 가동률을 적용한 연간 발전량의 경우 상대적으로 정확한 발전량 예측이 가능한 것으로 판단된다. 하지만, MERRA 재해석 자료를 이용한 풍력자원예측 및 발전량 예측은 대상 지점의 실측자료를 이용한 예측이 아니기 때문에, 이를 통해 기상관측타워의 설치 없이 풍력발전단지 상세설계 등이 이루어질 수는 없으며, 따라서 본 연구에서의

MERRA 재해석 자료를 이용한 발전량 예측의 적용범위는 풍력발전단지 개발 이전의 유망후보지 선정, 풍력발전단지 대략적 연간발전량 예측 및 개발 타당성 판단 등에 국한되어 사용되어야 한다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 MERRA 재해석 자료의 해상풍력발전단지 자원예측 적용타당성을 알아보기 위하여 간접적으로 중국동하이 대교 풍력단지의 발전량을 WindPRO와 WindSim 프로그램을 이용하여 예측하고, 그 결과를 실측 발전량 자료와 비교 분석하였다. 가용할 수 있는 발전량 자료가 11개월에 국한되어 11개월에 대한 예측을 수행한 결과, 11개월 전체에 대한 예측오차는 WindPRO와 WindSim 프로그램이 각각 -2.7%, 0.3%로 실측 발전량과 매우 유사한 결과를 보여주었다. 하지만, 문헌에서 제시하고 있는 연평균 풍력단지 가동률인 96.1%를 적용하였기 때문에 월간 발전량 예측은 WindPRO의 경우 -22.9% ~ +38.3%, WindSim의 경우 -18.2% ~ +26.0%의 예측 오차를 보여주었다. 하지만, 본 연구결과로 미루어 해상풍력발전단지의 경우 단지개발 이전에 개략적인 연간 발전량 예측을 위해, 연간 평균 가동률(96.1%)을 적용하여 충분히 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 발전량 예측 정확도는 풍력발전단지 개발에 있어서 기상관측타워의 설치없이 MERRA 재해석 자료만을 이용하여 단지개발이 가능하다는 것을 의미하는 것은 아니며, 풍력발전단지 개발 이전에 유망후보지 선정, 풍력발전단지의 개략적인 연평균 발전량 산정 및 개발 타당성 판단에 MERRA 재해석 자료가 적용 가능하다는 것을 의미한다. 하지만, 보다 일반적인 결론을

위해서는 보다 많은 해상풍력발전단지에 대한 예측 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 "10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발"의 지원으로 수행되었으며, 또한 본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다(과제번호 - 120140376).

본 논문은 2014년 한국 풍력에너지 추계 학술대회, 2015년 한국 정밀공학회 춘계 학술대회에서 발표되었습니다.

Reference

1. GWEC, Global Wind Report, 2013.
2. M. M. Rienecker, M. J. Suarez, R. Gelaro, R. Todling, J. Bacmeister, E. Liu, M. G. Bosilovich, S. D. Schubert, L. Takacs, G.-K. Kim, S. Bloom, J. Chen, D. Collins, A. Conaty, A. daSilva, et al., MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. J.Climate, Vol. 24, pp. 3624-3648, 2011.
3. H. G. Kim, K. H. Kim, and Y. H. Kang, "Wind resource assessment for green island - dokdo," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 94-101, 2012.
4. I. H. Kwon, U. S. Park, I. Peak, N. S. Yoo, "Application of MERRA Reanalysis data to predictions of offshore wind resources", KSES 2014 Spring annual conference, Vo. 34, No.1 May 13-14, 2014.
5. J. H. Kim, I. H. Kwon, U. S. Park, N. Yoo, and I. Paek, "Prediction of annual energy production of wind farms in complex terrain using MERRA reanalysis data," Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 2, pp. 82-90, 2014.
6. Y. Song, H. G. Kim, J. H. Byeon, I. Park, N. Yoo, "A Feasibility Study on Annual Energy Production of the Offshore Wind Farm using MERRA Reanalysis Data" Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 35, No. 2, pp. 33-41, 2015.
7. Shanghai Dong Hai Bridge Offshore Wind Farm Project Monitoring Report, UNFCCC reference number:2568, available online at <https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/BVQI1241775289.97/view>
8. <http://www.4coffshore.com/windfarms/donghai-bridge-100mw-offshore-wind-power-demonstration-project-china-cn01.html>
9. http://www.thewindpower.net/turbine_technical_en_82_sinovel_sl-3000-90.php
10. WindPRO User Guide 2.8.
11. WindSim AS, <http://www.sindsim.com/>
12. T. Wallbank "WindSim Validation Study, CFD validation in complex terrain", WindSim AS, 2008.
13. Risø Laboratory, <http://www.wasp.dk/>
14. C. H. Cho, Y. H. Rho, J. H. Lee, K. H. Lee, "Unsteady wake characteristics behind tidal current power turbine," Fluid machinery Research & development Conference, pp. 80-84. 2011.
15. Graves A, Harman K, Wilkinson M, et al. Understanding Availability Trends of Operating Wind Farms[C]//AWEA Wind Power Conference, AWEA. 2008.