

OpenWind를 이용한 풍력단지설계 사례연구 -영덕풍력단지

김현구* · 황효정¹⁾ · 김주현²⁾ · 고수희³⁾ · 정우식⁴⁾

한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터, ¹⁾우림텍 지리정보팀, ²⁾충남대학교 정보통계학과,
³⁾충남대학교 기계공학과, ⁴⁾인제대학교 대기환경정보공학과
(2010년 7월 16일 접수; 2010년 8월 9일 수정; 2010년 8월 14일 채택)

Case Study of Wind Farm Design Using OpenWind - Youngdeok Wind Farm

Hyun-Goo Kim*, Hyo-Jeong Hwang¹⁾, Ju-Hyun Kim²⁾, Soo-Hee Ko³⁾, Woo-Sik Jung⁴⁾

Wind Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

¹⁾GIS Team, WoorimTech, Daejeon 301-050, Korea

²⁾Department of Information Communications Eng., Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

⁴⁾Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

(Manuscript received 16 July, 2010; revised 9 August, 2010; accepted 14 August, 2010)

Abstract

A case study for the design of a wind farm in complex terrain was carried out using the wind farm site analysis software OpenWind, which has an open-source platform and is free to use. The Youngdeok Wind Farm, constructed on mountainous terrain in Korea, was chosen as a model site; the design process reproduced using OpenWind. A comparison of the positions of the wind turbine derived from the OpenWind optimization process and the current positions were in good agreement. The annual energy production predicted by OpenWind compared with the prediction by the micrositing software, WindSim, were also validated to within 1%. Therefore, it was confirmed that OpenWind can be used for a practical wind farm design project. It is also anticipating that this paper will provide a prototype process for the design of a wind farm site and offer a database for the post-evaluation of a constructed wind farm in Korea.

Key Words : OpenWind, WindSim, Wind farm design, Micrositing, Site analysis

1. 서론

풍력단지설계란 제약조건(constraint)을 회피하면

서 최대 에너지생산량을 확보할 수 있는 풍력발전기 최적배치를 찾아내는 것으로, 지리정보시스템(GIS; Geographical Information Systems)의 적지분석(site analysis)에 해당한다.

풍력단지개발에는 자연적(생태), 사회적(경관, 주민 수용성), 환경적(소음, 그림자), 기술적(경사도, 접

*Corresponding author : Hyun-Goo Kim, Wind Energy Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
Phone: +82-42-860-3376
E-mail: hyungoo@kier.re.kr

근성), 경제적(전력연계) 요인 등 다양한 제약조건이 복합적으로 존재한다. 따라서 이러한 제약조건을 회피하면서 에너지생산량 최대가 되는 풍력단지 최적배열을 찾아내기 위해서는 효율적인 적지분석 전략과 함께 수단이 필요하다(김 등, 2009).

본 연구에서는 복잡지형에 적합한 전산유동해석 기반의 국소바람지도(micrositing wind mapping) 프로그램인 WindSim(Meissner 등, 2009)과 풍력단지설계용 적지분석 프로그램인 OpenWind를 이용하여 현재 가동 중인 풍력단지 중 하나를 모델로 설정하여 재설계를 수행하였다. 이 과정을 통하여 기존 풍력단지의 배열과 OpenWind로부터 도출된 최적배열을 비교함으로써 효율적인 적지분석 방법에 대하여 고찰하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 적지분석 자료

2.1.1. OpenWind

OpenWind는 미국 AWS Truepower, LLC에서 개발한 풍력단지설계 및 단지배열 최적화를 위한 개방형 소스 기반(open-source platform)의 지리정보시스템(GIS; Geographical Information Systems) 형태의 공개 소프트웨어이다.

OpenWind는 공개 소프트웨어이면서 풍력단지설계에 필요한 필수적인 기능뿐만 아니라 소음, 경관해석 등의 부가기능까지 갖추고 있으며 지속적으로 개선되는 과정에 있다. 특히 사용자가 프로그램 개발에 직접 참여하여 원하는 기능을 추가할 수 있는 개방형 개발구조라는 장점을 가진다. 물론 현재로서는 고가의 상용 프로그램과 비교하여 사용 편의성이나 기능성이 떨어지기는 하지만 본 연구과정을 통하여 확인한 바에 의하면 주요 기능을 모두 포함하고 있어 풍력단지설계 실무적용에 아무런 문제가 없다고 판단된다.

OpenWind는 무상으로 제공되는 공개 소프트웨어임에도 불구하고 동일 목적의 전문적인 상용 소프트웨어인 영국 Garrad-Hassan & Partners, Ltd.의 WindFarmer와의 18개 풍력단지설계 프로젝트에 대한 비교검증을 통하여 이론적 풍력발전량 예측의 경우 불과 -0.01±0.05%의 차이를 나타내어 그 신뢰도를

입증한 바 있다(AWS Truepower, 2010).

OpenWind에서는 풍력단지의 연간에너지생산량(AEP; Annual Energy Production, kWh)을 다음의 식으로 계산한다.

$$AEP = 8760 \times \sum_{i=1}^{nD} \sum_{j=1}^{nU} \sum_{k=1}^{nT} F_{ijk} P_{ijk} \quad (1)$$

여기서 nD, nU, nT는 각각 풍향, 풍속 구간수 및 풍력발전기 수이다.

F_{ijk} 는 k번째 풍력발전기의 i번째 풍향 구간에서 j번째 풍속 구간 바람의 출현확률(frequency of probability)이며 P_{ijk} 는 동일 풍향, 풍속에서의 해당 풍력발전기 출력(power, kWh)이다.

바람의 출현확률 F는 와이불(Weibull) 분포함수로 정의되며 출력 P는 풍력발전기 기종에 따른 성능곡선(power curve)으로 주어진다.

OpenWind에서는 풍력발전기 배열의 후류손실(wake loss)을 고려하기 위한 후류모델로 Katic et al.(1996)의 수정단지모델(modified park model)과 Ainslie(1988)의 와점도모델을 채택하고 있다. 한편 WindSim에서는 Larsen(1988) 후류모델과 Ishihara et al.(2004) 후류모델을 채택하고 있다.

2.1.2. GIS 데이터

OpenWind에서는 일반적인 GIS 프로그램과 마찬가지로 GIS 데이터를 레이어(layer) 형식으로 다루며, 레이어를 구성하는 요소들은 벡터(vector) 및 래스터(raster) 데이터로 구분된다.

풍력단지 적지분석에 필요한 GIS 데이터는 크게 지리정보와 풍력자원정보로 구분할 수 있다. 지리정보로는 지형고도(terrain elevation)를 비롯한 도로, 건물, 수계, 토지피복도 등 각종 지형지물 요소가 포함된다. 풍력자원정보로는 국소바람지도와 풍향탑(met-mast) 계측정보 그리고 설치하려는 풍력발전기 정보 등이다. 일반적으로 지리정보는 국토지리정보원의 수치지형도로부터 적지분석에 필요한 레이어를 추출하여 제공한다.

본 연구에서 적용한 GIS 레이어는 Table 1에 정리하였다. 지리요소 중 지형고도(terrain elevation)는 래스터 형식의 DEM(Digital Elevation Model)을 이용

하거나 수치지형도로부터 등고선을 추출하여 사용할 수 있다. 지형경사도는 지형고도 레이어로부터 계산할 수 있다. 참고로 본 연구에서는 30m 해상도를 갖는 2009년 판 DEM을 이용하였다. 환경부에서 제공한 토지피복도(land cover map) 및 환경성평가지도(environmental assessment map)는 래스터 형식으로, 토지피복도로부터 피복분류에 해당하는 지면거칠기(surface roughness)를 산출하여 국소바람지도 작성에 필요한 지면경계조건으로 사용하였다. 환경성평가지도는 환경보존 가치가 높은 순서에 따라 1 등급부터 5 등급까지 등급이 매겨져 있다.

풍력자원정보로는 래스터 자료인 WRG(Wind Resource Grid) 형식의 국소바람지도가 필요한데, WRG 파일은 덴마크 Risø Laboratory의 WASP 또는 노르웨이 WindSim AS의 WindSim 등 국소바람지도 소프트웨어로 작성할 수 있다. 추가적으로 풍황탐 계측자료는 WASP의 계측자료 표준형식인 TAB 파일을 입력자료로 사용할 수 있으며, 풍력발전기는 제원, 성능곡선, 추력계수(thrust coefficient, C_t) 등을 입력하여 라이브러리(library)로 구성할 수 있다.

Table 1. GIS layers used in wind farm site analysis

| Element | Data type | File type | Contents |
|---------------|-----------|-----------|----------------------------------|
| Geographic | Raster | DEM | terrain elevation, terrain slope |
| | Raster | SHP | land cover |
| | Raster | SHP | environmental assessment |
| | Vector | SHP | stream, road, building, etc. |
| Wind resource | Raster | WRG | Wind Resource Grid |
| | Vector | TAB | Wind Frequency Table |

2.2. 풍력단지 적지분석

본 연구에서는 OpenWind를 이용한 풍력단지설계 모델로 경상북도 영덕군 영덕읍 영덕풍력단지를 선택하였다. 영덕풍력단지는 2005년 3월부터 상업운전을 시작하였으며 1.65MW급 NEG-Micon NM82C 풍력발전기 24기로 구성된 총 39.6MW 규모의 풍력단지이다. 영덕풍력단지를 모델로 선정할 이유는 해안가

복잡지형 산지에 조성되었기 때문에 풍력단지 적지분석에서 지리요소가 차지하는 비중이 큰 경우이며 또한 국소바람지도의 풍력자원분포도 변화가 클 것으로 적지분석의 기능을 뚜렷하게 보여줄 수 있는 사례로 판단되었기 때문이다.

다음과 같은 순서로 영덕 풍력단지 최적설계를 위한 적지분석을 수행하였다.

2.2.1. 배제분석(exclusion analysis)

지리정보 중 풍력단지조성이 불가능한 배제지역을 정의하는 과정으로, Table 2에 열거된 지리요소에 대해 완충영역인 버퍼(buffer)를 포함하여 배제지역으로 설정하였다. 그러나 도로의 경우에는 대형 구조물인 풍력발전기의 이송 및 설치공사의 제약조건 때문에 주도로로부터 50m 이상, 250m 이내를 설치가능 영역으로 설정하고 그 이외는 배제하였다.

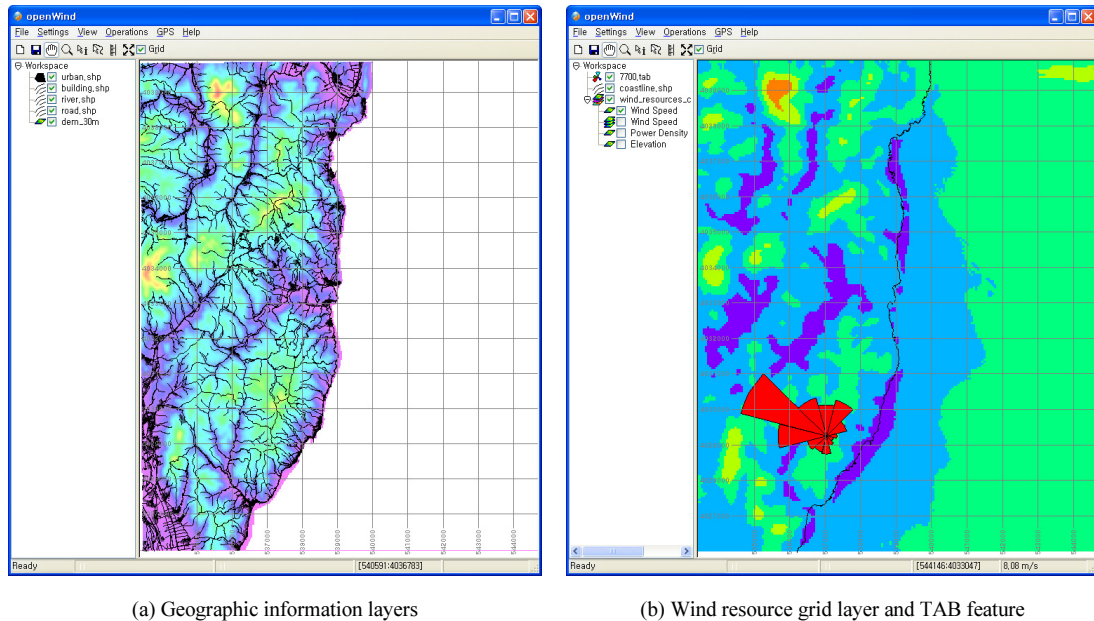
Fig. 1 (a)는 OpenWind에서는 배제분석을 위해 도심지, 건물, 하천 및 도로 레이어와 지형고도 DEM 레이어를 불러들인 화면을 보여주고 있다.

Table 2. GIS layers for exclusion analysis

| Layer name | Valid area | Criterion |
|---------------|--------------|----------------|
| river.shp | Outside | Buffer 50m |
| road.shp | Outside | Buffer 50m |
| building.shp | Outside | Buffer 100m |
| urban.shp | Outside | Buffer 100m |
| Site Boundary | Inside | Buffer 0m |
| road-distance | Raster value | Less than 250m |
| dem-gradient | Raster value | Less than 0.2 |
| environment | Raster value | Greater than 1 |

2.2.2. 경계설정(site boundary)

Fig. 2 (b)는 WindSim으로 작성한 국소바람지도 WRG 레이어와 풍황탐 계측자료 TAB 파일을 불러들인 화면을 보여주고 있다. 영덕지역은 산지지형이기 때문에 전산유동해석 기반의 WindSim으로 대기유동장 해석을 수행하여 국소바람지도를 작성하였다. Fig. 2의 화면에 나타내어진 대상영역은 영덕풍력단지 영역보다 5×5배의 광범위한 영역으로, 복잡지형에서의



(a) Geographic information layers

(b) Wind resource grid layer and TAB feature

Fig. 1. Theme layers loaded on OpenWind.

대기유동장 해석시 풍상부(upstream) 경계조건 의존성을 최소화하기 위하여 충분히 넓은 해석영역을 설정한 것이다.

따라서 영덕풍력단지를 모델로 한 적지분석을 위해서는 대상영역을 그에 맞도록 설정하는 절차가 필요하다. Fig. 2 (a)에서 적색 다각형으로 표시된 영역이 바로 적지분석을 위해 설정된 경계선이다.

OpenWind에서 경계영역 내에서만 적지분석이 수행되도록 하려면 Table 2와 같이 해석영역을 경계선(site boundary) 내부로 지정하여야 한다. 참고로 하천, 건물 등의 지리요인은 버퍼영역 외부로 배제하도록 설정하였다.

2.2.3. 경사도분석

풍력발전기는 토목공사의 제약조건에 따라 지형경사도가 급한 지점에 설치할 수 없다. 따라서 지면경사도를 배제요인으로 추가하여야 한다. OpenWind에서는 지형고도 DEM으로부터 지형경사도를 계산할 수 있으며 이를 dem-gradient 레이어로 명명하였다. 본 해석에서는 지형경사도 0.2 이상인 경우 부적합지로 배제하였다. 참고로 0.2는 수평면으로부터 경사도 15

도에 해당한다.

2.2.4. 환경성평가

본 사례연구에서는 환경부 환경성평가지도를 적지분석을 위한 평가조건으로 적용하지는 않았다. 풍력단지는 주로 풍향이 우수한 고산지 능선에 조성되기 때문에 대부분 환경보전가치가 높은 지역에 해당될 것으로 예상된다. 영덕풍력단지가 조성된 창포리 산지 일대도 환경성평가지도에 의하면 1 등급의 환경보전가치가 가장 높은 지역으로 분류되어 있다. 그러나 영덕풍력단지는 1997년 대규모 산불로 산림이 완전히 훼손된 이후 풍력단지가 조성되었기 때문에 풍력단지 개발로 인한 환경피해는 없는 것으로 보고되었다.

2.2.5. 풍력발전기 기종선정 및 후류모델 선정

경계영역 내에서 국소배치를 결정하기 위해서는 설치할 풍력발전기를 결정하여야 한다. 본 해석은 영덕풍력단지과 동일하게 1.65MW급 풍력발전기인 NEG-Micon MN82C을 설치기종으로 선정하였으며 제원, 성능곡선, 추력곡선 등은 풍력발전기 기종 제원(Turbine Type Specification) 메뉴를 통해 입력함으로써 풍력발전기 라이브러리에 추가할 수 있다.

풍력발전기는 후류영향을 최소화하기 위하여 상호 이격거리를 두고 설치하게 되므로 이러한 제약조건도 부과하여야 한다. Fig. 1 (b)의 영덕풍력단지 영역의 대표지점에서 실시된 풍향탑 계측결과를 보면 바람장미의 주풍향이 북서풍이 탁월하게 나타나고 있다. 따라서 주풍향 방향으로 장축을 가지는 타원의 배재영역을 풍력발전기마다 부과함으로써 후류영향을 최소화하는 배열을 찾게 된다.

본 해석에서는 주풍향은 250도, 장축과 단축은 3D×2D로 설정하였으며 D는 풍력발전기 블레이드 지름이다. 일반적으로 이격거리는 5D 이상으로 설정하지만 본 해석에서는 영덕풍력단지 배열의 최소 이격거리를 참조하여 상기 이격거리를 부과하였다.

2.2.6. 배열 최적화(layout optimization)

OpenWind는 설정된 경계영역으로부터 각종 배제영역을 제외하고 나서 남는 영역을 새로운 레이어로 생성할 수 있다. Fig. 2에서 파란색 영역이 이러한 과정으로 생성된 설치가능 영역 레이어로, OpenWind는 이 영역 내에서 풍력발전기간 이격거리를 지키면서 설치위치를 바꾸어가며 최대 에너지생산량을 수확할 수 있는 최적배열을 찾게 된다.

2.2.7. 가상현실 풍력단지(virtual wind farm)

풍력단지설계에서 고려하여야 할 주요한 요건 중 하나는 경관(landscape) 문제이다. OpenWind에서도 경

관해석을 위한 한 가지 방법으로 풍력발전기 배치와 더불어 모든 GIS 레이어를 역시 공개 프로그램인 Google Earth에서 활용할 수 있는 KML 파일로 저장할 수 있는 기능이 있다. Fig. 3은 Fig. 2의 최적배열과 함께 풍력밀도(wind power density) 레이어를 Google Earth로 전달하여 3차원 가상현실로 나타낸 이미지이다.

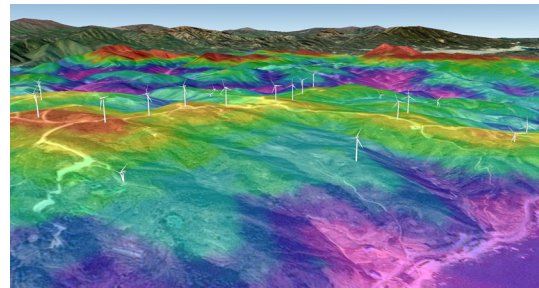


Fig. 3. Virtual wind farm displayed on Google Earth and designed by OpenWind.

3. 적지분석 결과

3.1. 최적배치 비교

OpenWind의 풍력발전기 설치위치 최적화(Turbine Position Optimization) 기능을 이용하여 결정한 총 24기의 풍력발전기 설치위치와 현재의 영덕풍력단지에 설치된 풍력발전기 위치를 비교한 그림을 Fig. 4에 도

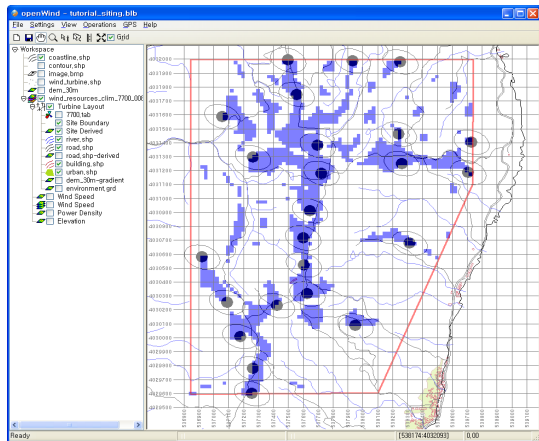


Fig. 2. Feasible area for wind turbine installation (blue area) and derived optimum wind turbine positions (black circles).

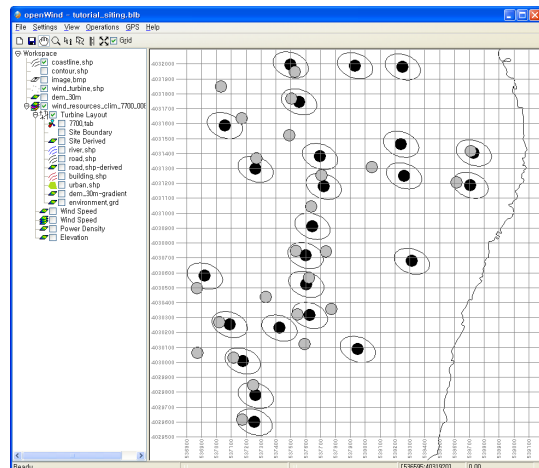


Fig. 4. Comparison of the current positions of wind turbine(gray circles) and the optimum positions derived by OpenWind(black circles with ellipse).

시하였다. Fig. 4에서 타원으로 후류영향권이 표시된 검은색 원은 OpenWind 최적화에 의해 국소배치된 풍력발전기 위치이고 회색원은 영덕풍력단지의 풍력발전기 기설치 지점이다. 참고로 원의 지름은 풍력발전기 블레이드 지름과 동일하다. 참고로 영덕풍력단지 기존배열은 인공위성영상을 이용하여 좌표를 확인하였다.

풍력발전기 16기는 영덕풍력단지 기설치 위치와 최대 2D 이내에서 설치위치가 결정되었으나 나머지 8기는 다소 이격된 위치에 배치되었다. 즉, 북쪽으로 중앙 상단 우측의 2기 등 대부분은 풍력단지 경계영역을 넓게 설정함에 따라 행정적으로 풍력발전기 설치가 불가능한 영역이 배제되지 못하였기 때문이다. 한편 현재 영덕풍력단지 중앙부 설치위치는 Fig. 1 (b)의 주풍향을 고려할 때 후류손실 측면에서 OpenWind의 배치에 비하여 다소 불리하게 설치된 것으로 판단된다. 참고로 풍력발전기 최종배치는 토목공사 제약조건에 의해 불가피하게 재조정 되는 경우가 발생한다.

3.2. 풍력발전량 비교

본 절에서는 OpenWind의 풍력발전량 예측 정확도를 검증하기 위하여 WindSim의 풍력발전량 예측결과와 비교 하였다. 이때 풍력발전기 배열은 현재 영덕풍력단지 배열을 두 프로그램에서 동일하게 적용하였으며, 비교결과는 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Comparison of net energy productions predicted by OpenWind and WindSim

| Wake model | | No wake model | Eddy viscosity model | Modified park model |
|------------|------------------|---------------|----------------------|---------------------|
| OpenWind | Net Energy (GWh) | 144.0 | 124.9 | 127.6 |
| | Wake loss | - | 13.3% | 11.4% |
| Wake model | | No wake model | Larsen model | Ishihara model |
| WindSim | Net Energy (GWh) | 144.1 | 137.9 | 128.9 |
| | Wake loss | - | 5.7% | 11.9% |

후류손실을 고려하지 않은 이론적 최대 연간에너지생산량은 OpenWind와 WindSim이 각각 144GWh, 144.1GWh로 불과 0.07%의 미소한 차이만 나타나고 있어 OpenWind의 풍력발전량 계산모델의 정확도를 재검증 할 수 있다.

OpenWind와 WindSim은 각각 채택하고 있는 후류모델이 동일하지 않기 때문에 후류손실을 고려한 경우에 대한 직접적인 비교는 할 수 없다. 그렇지만 Table 3의 후류모델을 적용한 예측결과를 통하여 Larsen 후류모델을 제외한 모든 경우가 10% 이상의 후류손실을 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

GIS 적지분석 기반의 풍력단지설계 및 단지배열 최적화 공개 소프트웨어인 OpenWind를 이용하여 모델사레인 영덕풍력단지에 대한 최적설계를 수행하였으며 적지분석 결과를 분석함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) OpenWind는 공개 소프트웨어임에도 불구하고 다양한 지리정보를 입력하여 복합적인 배제조건을 적용하여 적지분석을 할 수 있었다.

(2) OpenWind로 설계한 최적배치와 현재 영덕풍력단지의 배열과의 비교분석을 통하여 유사한 최적배치를 도출하였음을 확인하였다. 또한 OpenWind의 전력생산량 예측정확도를 검증하기 위하여 WindSim의 예측결과와 비교하였으며, 두 결과가 동일함을 확인하였다.

(3) 결론적으로 OpenWind는 풍력단지설계 현업에 사용가능한 수준의 기능과 정확도를 제공함을 확인하였다.

본 연구는 실제 풍력단지설계에 OpenWind를 적용하여 프로그램의 기능과 예측 정확도를 평가하였을뿐 아니라 아직 국내에서는 공식적으로 시도된 바 없는 풍력단지 사후평가를 위한 기초 분석자료를 제공한다는 점에서 의미가 크다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원 부처임무사업 및 충남대학교 백마인턴십 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김현구, 송규봉, 황선영, 윤진호, 황효정, 2009, 국가바람 지도 및 지리정보시스템 기반의 해상풍력단지 입지 전략 연구, 한국환경과학회지, 18(8), 877-883.
- Ainslie, J. F., 1988, Calculating the flow field in the wake of wind turbines, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 27, 213-224.
- AWS Truepower, 2010, OpenWind theoretical basis and validation version 1.3, AWS Truepower, LLC, USA.
- Ishihara, T., Yamaguchi, A., Fujino, Y., 2004, Development of a new wake model based on a wind tunnel experiment, Proceedings of the Global Wind Power.
- Katic, I., Højstrup, J., Jensen, N. O., 1996, A Simple model for cluster efficiency, Proceedings of the European Wind Energy Conference, Rome, Italy.
- Larsen, C. G., 1988, A simple wake calculation procedure, Risø-M-2760, Risø Laboratory, Denmark.
- Meissner, C., Gravidahl, A. R., Steensen, B., 2009, Including thermal effects in CFD wind flow simulations, 한국환경과학회지, 18(8), 833-839.