

복잡지형에서 난류강도를 고려한 풍력발전단지설계

Wind Farm Design Considering Turbulence Intensity on Complex Terrain

박미호* · 고경남**† · 허종철***

Park Mi-ho, Ko Kyung-Nam, Huh Jong-chul

(Submit date : 2013. 8. 7., Judgement date : 2013. 8. 14., Publication decide date : 2013. 12. 12.)

Abstract : The investigation on wind farm design using CFD technique was carried out to reduce turbulence intensity in a wind farm. A potential wind farm in Gasiri of Jeju Island was selected for the design and the commercial S/W of Meteodyn WT was used for applying CFD technique. The initial layout of wind turbines was derived using WindPRO which is mainly used for wind farm design in Korea. Then, the distribution of turbulence intensity on complex terrain was calculated and visible by Meteodyn WT. Based on the distribution, wind turbines were positioned properly. As a result, wind turbines could be deployed at positions with minimum turbulence intensity as well as maximum Annual Energy Production, AEP, using Meteodyn WT. It is necessary to take into account turbulence intensity in wind farm design to avoid wind turbine failure.

Key Words : wind energy (풍력에너지), Wind data (바람데이터), Annual Energy Production; AEP (연간 발전량), WASP

기 호 설 명

$I_{u_{mean}}$: Mean turbulence intensity	$I_{u_{representative}}$: Representative turbulence intensity
$I_{u_{ambient}}$: Ambient turbulence intensity	$I_{u_{effective}}$: Effective turbulence intensity
$I_{u_{added}}$: Added turbulence intensity	$I_{u_{rot}}$: Turbulence intensity at rotor
		$I_{u_{\sigma}}$: Standard deviation of turbulence measurements

**† 고경남(교신저자) : 제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정 E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064)754-4401
 ** Ko, Kyung-Nam(corresponding author) : Interdisciplinary Postgraduate Program in Wind Energy, Jeju National University. E-mail : gnkor2@jejunu.ac.kr, Tel : 064)754-4401
 *박미호 : 제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정
 *Park, Mi-Ho : Interdisciplinary Postgraduate Program in Wind Energy, Jeju National University.
 ***허종철 : 제주대학교 기계공학과
 ***Huh, Jong-Chul : Department of Mechanical Engineering, Jeju National University

$U_{downwind}$: Downwind wind speed
U_{upwind}	: Upwind wind speed
D_{rotor}	: Diameter at rotor
C_{wake}	: Wake reduction coefficient
V_{hub}	: Wind speed at hub-height
C_t	: Thrust coefficient
k	: Wake decay constant

1. 서 론

현재 우리나라에 설치되어 운영 중인 풍력 발전단지는 총 491.6MW로 2000년 이후 연평균 54%의 설비증가율¹⁾을 보여주고 있으며, 전남 4GW, 서남해 2.5GW, 제주 2.0GW 등의 정책 시행계획을 감안할 때 가까운 미래에 1GW 용량이 국내에 설치되어 운전 될 것이라 생각된다. 이처럼 풍력발전단지가 증가하고 있지만, 단지설계 시 필요한 기술력 축적은 풍력기술 선도국에 비해 부족한 실정이다. 우리나라는 유럽에 비해 산악지역이 많으므로 풍력단지 설계 시 풍력시스템 후방에 생기는 후류와 함께 복잡지형으로 인한 난류강도의 증가를 반드시 고려하여야 한다.

단지 내 난류강도의 증가로 인해 발생하는 문제점으로는 비정기 점검 횡수가 증가하거나 극한 하중 및 피로하중의 증가로 인한 풍력시스템의 설계수명 보장이 어려워진다는 점이다. 이에 대한 대책 중 하나는 난류강도를 분석하여 풍력시스템 특정각도에서의 작동을 정지시켜 난류강도를 줄이는 Sector Management 전략을 대상 풍력발전단지에 적용시키는 것이다.²⁾

풍력단지 설계 시 우리나라는 물론 세계적으로 널리 사용되고 있는 WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)은 선형이론모델을 이용하여 풍력자원 분석을 수행하

로 난류강도를 고려한 풍력발전단지 설계를 수행하기에는 한계가 있다.³⁾ 특히 복잡지형에 위치한 풍력발전단지에 WAsP을 이용하여 풍력자원을 분석 할 경우 언덕효과, 유동박리현상, 대기안정도를 고려하기가 어렵다. 그러나 이 모델은 지형경사각이 5도 이상부터 오차율이 증가하기 시작하여 15도 이상에서는 유동박리현상에 의해 더 이상 적용하기가 어려워진다. 덴마크 Riso 연구소에서는 그 대안으로 주변 지형의 복잡도를 나타내는 RIX(Ruggedness Index)를 이용한 보정식을 통하여 예측율을 향상시키는 노력을 진행하여왔다. 그러나 각종 파라미터 선정 시 경험에 의한 의존도가 높아 타 풍력단지에서 진행된 연구사례를 참조데이터로 사용하기에는 각 단지마다 지형적인 특성이 달라서 신뢰성이 부족하다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 Navier-Stokes 방정식과 난류모델을 3차원 유동장에서 수치해석하여 근사값을 구하는 전산유체해석(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 최대한 실제 환경조건과 비슷하게 모사함으로써 풍력자원을 평가하는 방법이 적용되어왔다. 최근에는 상용소프트웨어로 개발된 Meteodyn WT의 예측율이 WAsP보다 높다는 연구결과⁴⁾가 나와서 관심이 고조되고 있다.

이 연구에서는 제주도에 널리 분포하는 오름(작은산)의 영향과 이웃하는 풍력시스템의 간섭으로 인한 난류강도를 CFD기법을 적용하여 개발된 S/W인 Meteodyn WT v4.5를 이용하여 분석하였다. 복잡지형특성을 보여주는 제주도 가시리 풍력지구로 지정된 사이트에 난류강도를 최소화 하는 풍력단지설계를 수행하여 우리나라에서 주로 사용되는 WAsP 및 WindPRO로부터의 결과를 향상시키는 방안을 제시하고자 한다.

2. 풍력단지 설계 S/W 소개

2.1 WindPRO

WindPRO에서 연동되는 WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)은 덴마크 Riso연구소에서 개발하였으며, 복잡지형을 지나는 유동장 해석을 위하여 개발된 유한 체적 모델을 이용한다.

유동이론은 Troen(1990)의 BZ-model을 사용하였는데 이는 언덕을 지나는 유동해석을 위한 Jackson과 Hunt 이론(1975)과 유사하다.⁵⁾

WinPRO의 경우 선형적으로 단순화된 후류 모델 및 난류모델이 적용되어 풍력발전단지내 각 풍력시스템에서의 풍속저감량과 난류강도의 증가를 분석할 수 있도록 설계되었다. 그러나 오름에 의한 난류강도의 증가는 구할 수 없다.

2.2 Meteodyn WT

이 소프트웨어는 2003년 Didier Delaunay에 의해 프랑스에서 개발되었고, 현재 전세계 40여개국에서 사용되어지고 있지만 우리나라에서는 아직 WAsP만큼 사용하고 있지는 않다. Meteodyn WT는 전산유동해석법을 기반으로 설계되었는데, 정상류 및 비압축성으로 가정하고 직교 좌표를 사용하였다. RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식과 1-equation 난류모델식을 사용한다. 이 난류모델은 난류 운동에너지를 계산하므로써 복잡지형에서 후류영향에 따른 유동변화를 계산하는데 적합하다. 난류모델에 사용되는 난류길이 척도는 계산 초기에 Yamada와 Arritt가 제시한 모델⁶⁾을 이용하여 계산되는데, 이 모델은 대기안정도를 고려할 수 있다. 경계층 조건에서 유입 조건은 Ekman function⁷⁾과 로그법칙을 이용

하여 풍속의 수직분포를 모사하였고, 지반조건으로는 Monin-Obukhov 이론을 이용하여 평균풍속과 실제 지형거칠기를 고려할 수 있도록 하였다.

이 모델은 자동으로 Forest canopy를 고려하게 되며, 지면거칠기의 30배로 가정된다. 또한, IEC 표준을 준수하여 복잡지형에서의 난류강도를 계산하여주고, 난류에 대해 자세히 고려하여 풍력발전단지를 설계할 수 있는 기능을 제공한다.

WinPRO와 같은 선형적인 후류모델과 난류 모델이 적용되었지만 Meteodyn WT에서는 3차원에서의 실제 유동각의 난류강도를 구할 수 있으며, 지형에 의한 Speed up 효과를 고려하여 WindPRO보다 상세한 풍속저감량과 난류강도의 증가를 분석할 수 있다.

2.3 적용 후류 및 난류 모델⁸⁾

2.3.1 Modified Park Model

저감된 풍속을 계산하기 위하여 기존에 사용되는 후류모델 중 N.O, Jensen이 분석(1983)하고 I. Katic 이 제안(1993)한 Park 모델⁹⁾을 S. Frandsen이 수정한 것이 Modified Park 모델이다.

후류에서의 풍속감소계수 C_{wake} 는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$C_{wake} = \frac{U_{downwind}(x)}{U_{upwind}} = 1 - (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D_{rotor}}{D_{rotor} + 2kx} \right)^2 \quad (1)$$

$U_{downwind}(x)$ 는 후류내에서 풍력시스템으로부터 거리 x 에서의 풍속, U_{upwind} 는 전방에서 불어오는 풍속, C_t 는 풍력시스템의 추력계수를 나타낸다.

$$C_{wake} = \frac{U_{downwind}(X_{WT2})}{U_{upwind}} \quad (2)$$

$$= 1 - (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{D_{rotor}}{D_{rotor} + 2kx_{WT2}} \right)^2 \frac{A_o}{A_{WT2}}$$

후방에 위치한 풍력시스템이 전방에서 생성된 후류의 영향을 받는 경우 중첩된 면적을 이용하여 후류의 중첩영향을 고려할 수 있으며, 식 (2)에 의하여 계산된다.

X_{WT2} 는 후방에 위치한 풍력시스템으로부터의 거리이며, A_{WT2} 는 후방에 위치한 풍력시스템의 회전자 면적, A_o 는 전방에 위치한 풍력시스템과의 중첩된 면적이다.

2.3.2 Frandsen Turbulence Model¹⁰⁾

이웃하는 풍력시스템간의 후류로 인해 증가되는 부가 난류강도(The added turbulence intensity)는 Frandsen과 Thogersen이 제안한 아래 식으로 계산할 수 있다.

$$I_{u_{added}} = \frac{1}{1.5 + 0.3 \left(\frac{x}{D} \right) \sqrt{V_{hub}}} \quad (3)$$

x 는 풍력시스템간의 이격거리, D 는 회전자 직경, V_{hub} 는 후류를 생성하는 풍력시스템 허브높이의 평균풍속을 말한다. 이 식에 따르면 풍속이 증가할수록 이격거리에 따른 부가 난류강도의 영향은 감소한다.

유효 난류강도(The effective turbulence intensity)를 구하기 위해서 아래 식을 사용한다.

$$I_{u_{effective}} = \sqrt{I_{u_{ambient}}^2 + I_{u_{added}}^2} \quad (4)$$

식 (4)에서 주변 난류강도(The ambient turbulence intensity)의 경우 지형특성에 의

존하며, 부가 난류강도는 풍력시스템에서 발생하는 후류에 의해 증가 또는 감소하게 된다.

3. 분석대상

2013년 제주도청에서 풍력지구로 지정한 사이트들 중 가시리지구를 대상으로 WindPRO와 Meteodyn WT를 이용하여 난류강도를 고려한 풍력발전단지를 설계하였다.

3.1 분석지역

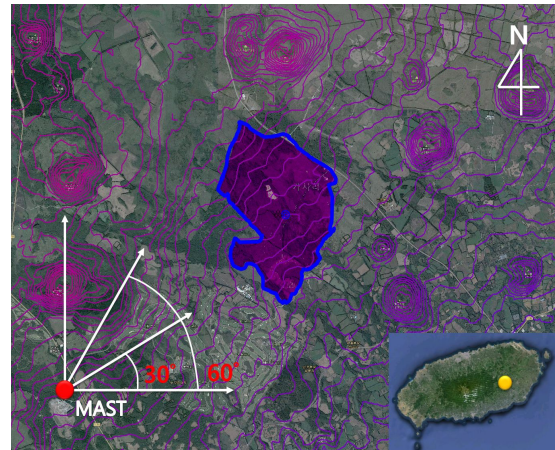


Fig. 1 Gasiri site for wind farm with a contour by WindPRO

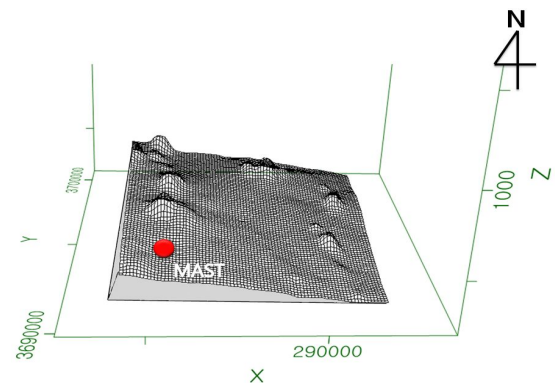


Fig. 2 Gasiri site for wind farm with a contour by Meteodyn WT

Fig. 1은 WindPRO를 이용하여 작성한 가시리 풍력지구를 보여준다. 굵은선 안쪽이 선정된 풍력지구이고 남서쪽으로 떨어진 곳에 기상탑이 설치되었다. 농지와 목초지로 형성되어 있으며, 북쪽으로는 골프장이 위치하고 있다. 가시리 풍력지구가 오름들로 둘러싸여 있음을 2D로 파악할 수 있다.

Fig. 2는 Meteodyn WT를 이용하여 생성한 가시리 풍력지구를 보여준다. 분석대상인 가시리 풍력지구의 지형형상을 3D로 보여주고 있어 오름 높낮이를 시각적으로 쉽게 확인할 수 있다. 가시리 풍력지구는 오름으로 둘러싸인 지형을 보여주고 있으며, 한라산 정상방향인 북서쪽과 서쪽은 지형이 높고, 동쪽 및 남동쪽으로는 지형이 낮아지는 형태를 보이고 있어 주풍방향으로 풍속의 가속현상이 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Properties of configuration for grid

Properties	Parameters
Minimum horizontal resolution	50m
Minimum vertical resolution	10m
Horizontal expansion coefficient	1.1
Vertical expansion coefficient	1.2
Verticality parameter	0.7
Smoothing	1
Forest model	Robust model
Maximum iteration number	25
Thermal stability class	2 = neutral stability
Mesh	1215293 points (197*199*31)
convergence	100%

Table 2. Gasiri site and type of wind turbine

Location	Gasi-ri, Pyoseon-myeon, Seogwipo-si, Jeju-do, South Korea	
Capacity	30MW = 3MW × 10Units	
Type of wind turbine	Name	Vestas V90
	Diameter	90m
	Hub height	80m
	Control type	Variable Pitch
	Cut-in	4m/s,
	Regulated	15m/s
	Cut-out	25m/s

Table 1은 가시리 풍력지구의 CFD해석을 위하여 구성한 격자의 파라미터를 보여준다. 최소격자길이는 수평방향으로 50m, 높이방향으로 10m를 입력하였고 표에서의 파라미터가 적용되면 격자는 총1,215,293포인트를 갖는다.

Table 2에 가시리 풍력지구 및 적용된 풍력시스템을 나타낸다. VESTAS V90 기종을 사용하였으며, 날개직경은 90m이고 허브높이는 80m이다.

3.2 분석지역 풍황데이터

Table 3. Met. mast properties

Location	Sumang-ri, Namwon-eup, Seogwipo-si, Jeju-do, South Korea
Coordinate system	285360.25, 3693006.50 (UTM WGS 84)
Measurement period	2006. 11 ~ 2009. 6 (31 months)
Height of anemometer	55m, 40m, 30m
Distance	4.2 km away from WF
Measured data	Wind speed, Wind direction, Humidity, Temperature

Table 3에 풍력지구내의 난류강도를 분석하기 위해서 사용된 기상탑에 대한 내용을 나

타내었다. 가시리 풍력지구로부터 남서쪽으로 4.2km 떨어진 위치에 설치되었으며, 측정기간은 2006.11 ~ 2009.6으로 31개월간이다.

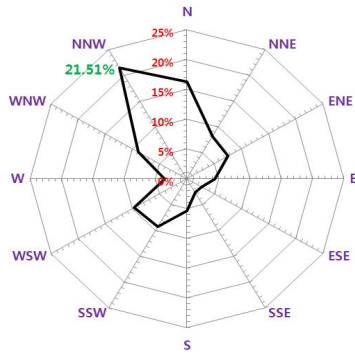


Fig. 3 Wind rose of the measured data

Fig. 3은 측정된 바람데이터를 이용하여 12방위로 작성한 바람장미이다. 주풍향은 북북서로 21.51%의 높은 빈도율을 보여주고 있으며, 전형적인 제주도 바람특성인 북풍계열의 바람이 많이 불고 있는 것을 알 수 있다. 난류강도는 IEC 61400-1 ed.3기준에 따라 아래와 같은 식 (5)을 사용하였다.

$$I_{u_{representative}} = I_{u_{mean}} + 1.28I_{u_z} \quad (5)$$

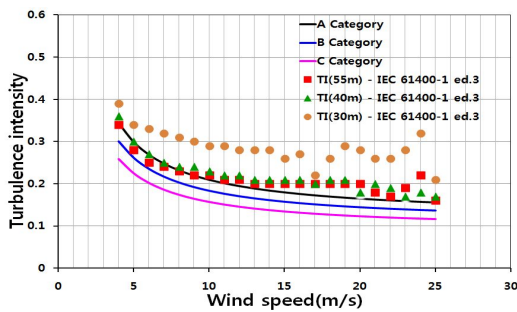


Fig. 4 Turbulence intensity of the measured data (30m, 40m, 55m)

Fig. 4에 식 (5)를 적용한 난류강도분포를

나타낸다. 보이는 바와 같이 난류강도가 높게 측정되었는데 이는 측정지역 주변지형의 높은 거칠기와 오름으로 인한 영향으로 보인다. 해상풍의 경우 풍속에 따른 파도표면의 거칠기 증가로 고풍속으로 갈수록 난류강도가 증가하게 된다¹¹⁾. 본 논문에서의 난류강도분포도 이와 비슷한 경향을 보여주고 있는데, 그 이유는 다수의 오름이 분포한 제주도 지형에서 고풍속의 유동이 통과할 때 발생하는 유동박리현상에 의한 난류성분 증가 때문으로 생각된다.

4. 난류강도를 고려한 단지설계 방법 및 결과

4.1 소프트웨어 검증

여기서 사용한 Meteodyn WT의 계산결과에 대한 검증을 하기 위하여 기상탑에서 측정된 풍황데이터를 이용하였다. 30m와 40m에서 측정된 바람데이터를 이용하여 55m에서의 난류강도를 예측하고, 실제 55m에서 측정된 난류강도와 비교함으로써 검증을 진행하였다.

Fig. 1에 도시한 바와 같이 기상탑 위치에서 30°와 60° 방향에서 측정된 바람 데이터를 선정하여 예측 값과 비교분석하였다. 그 이유는 기상탑에서 30도와 60도 방향으로 해석도메인이 가장 길기 때문에 유입되는 유동이 지형의 특성을 가장 잘 나타낼 것으로 판단되었기 때문이다.

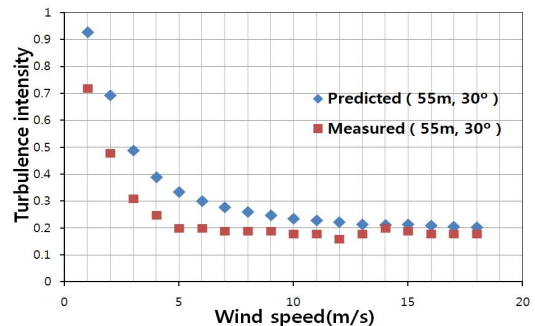


Fig. 5 Predicted and measured TI (55m, 30°)

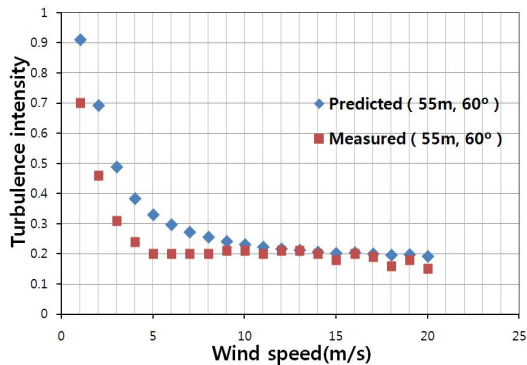


Fig. 6 Predicted and measured TI (55m, 60°)

Fig. 5와 Fig. 6은 그 결과를 보여준다. 저풍속 영역에서는 오차가 다소 발생하지만 10m/s 이상의 고풍속영역에서는 정확도가 높다. IEC 61400-1 ed.3에 의하면 15m/s의 풍속에서 난류강도를 평가하므로 Meteodyn WT는 난류강도의 예측 정확도가 비교적 높은편이라고 판단된다. 그러나 여러 조건에 대하여 계속 검증하여 장단점을 확실히 파악하여야 할 것이다. 또한 30° 방향보다 60°방향에서의 오차가 적음을 알 수 있는데, 그 이유는 Fig. 1에서 보이는 것처럼 30°방향으로는 고도차가 170m의 오름에 의해 유입되는 유동에 영향을 미치나 60°방향에는 고도차 50m의 작은 오름이 있어 상대적으로 유입되는 유동에 영향을 적게 주기 때문으로 생각된다.

4.2 풍력단지설계 방법

기존의 풍력발전단지 설계 툴인 WindPRO는 AEP를 최대화하여 각 풍력시스템을 배치시키는 OPTIMIZE 모듈을 사용자가 이용할 수 있도록 하였으나 오름 및 이웃하는 풍력시스템의 난류강도까지 고려한 최적배치를 할 수는 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 오름 및 풍력시스템에 의해 발생하는 난류강도를 고려하여 풍력단지설계를 수행할 수 있는 Meteodyn WT를 적절히 조합하여 풍력단지

설계과정에 적용시키면 난류강도를 최소화하고 연간발전량을 최대화하는 최적설계를 할 수 있을 것이다.

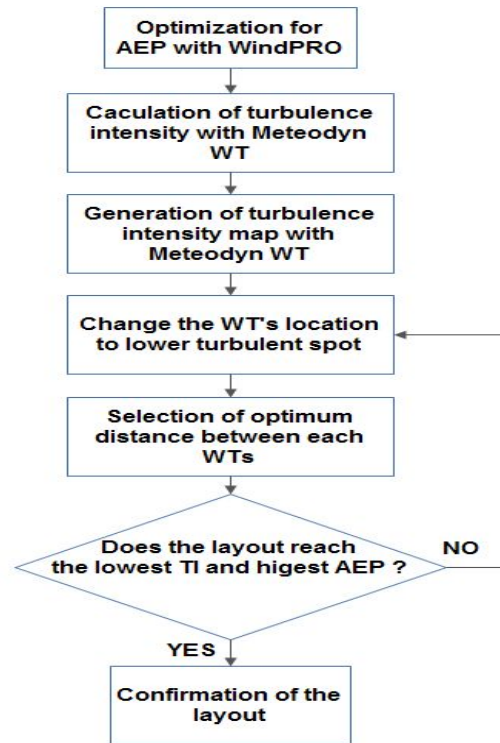


Fig. 7 Flow chart for wind farm design considering TI

이 연구에서 난류강도를 고려한 풍력발전단지 설계 방법은 Fig. 7과 같다. 그 과정은 다음과 같다.

- (1) WindPRO 모듈 중 최적화배치 모듈을 이용하여 AEP를 최대로 하는 초기 풍력단지를 설계한다.
- (2) Meteodyn WT를 이용하여 각 풍력시스템에서의 난류강도를 계산한다.
- (3) Meteodyn WT를 이용하여 풍력발전단지 내 난류강도 지도를 생성한다.
- (4) Meteodyn WT를 이용하여 각 풍력시스템에서의 난류강도와 생성된 난류강도지도

를 이용하여 상대적으로 감소한 난류강도 지역으로 위치를 변경한다.

- (5) Meteodyn WT를 이용하여 이웃하는 풍력시스템의 후류영향을 고려하여 풍력시스템간의 이격거리를 선정한다.
- (6) Meteodyn WT를 이용하여 AEP를 최대화하고 난류강도를 최소화하는 조건을 만족할 때까지 (4)~(5)의 과정을 반복한다.
- (7) 풍력단지 풍력시스템 배치를 확정한다.

이러한 난류강도를 고려한 풍력발전단지 설계방법은 AEP는 최대화시키면서 난류강도로 인한 풍력시스템이 받는 악영향을 줄이는데 기여할 수 있을 것이라 생각된다.

4.3 풍력단지설계 과정 및 결과

전술한 풍력단지 설계 과정 중 (1)을 수행하였다. 즉, WindPRO에 내장된 RESOURCE 모듈을 이용하여 풍력자원지도를 생성시키고 이 지도를 바탕으로 OPTIMIZE 모듈을 이용하여 AEP가 최대가 되는 최적배치를 수행하였다.

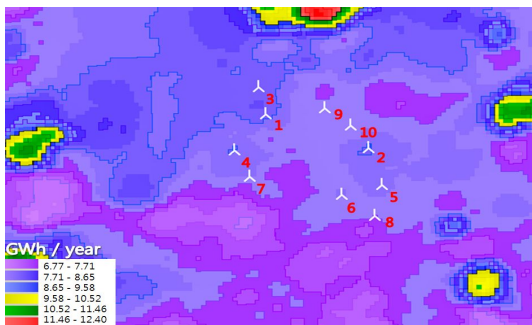


Fig. 8 Initial layout designed by WindPRO (80m)

Fig. 8은 그 결과를 보여준다. 최소 이격거리는 360m(4D), Random Pattern, 그리고 Full energy 최적화 방법을 적용하였다. 50m의 격자로 생성한 풍력자원지도를 이용하여 최적배치를 수행한 단지배치와 80m높이에서의 AEP

분포를 동시에 보여 준다.

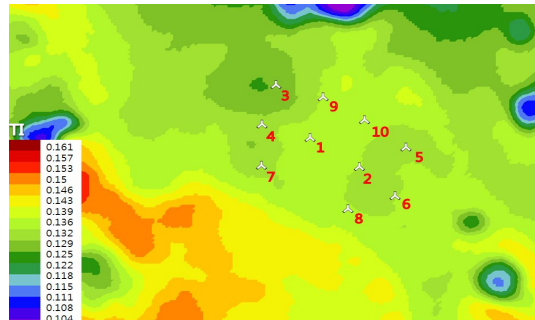


Fig. 9 Final layout on the ambient TI at 80m a.g.l.

Fig. 8에 나타낸 WindPRO를 사용한 초기 풍력단지설계 결과를 얻은 다음, Meteodyn WT를 이용하여 난류강도분포를 생성하였다. Fig. 9에 나타낸 난류강도분포는 WinPRO에서는 얻지 못하는 지도로서 주변에 위치한 오름과 골프장 등에 의해 주변 난류강도가 높은 수치를 보여주고 있다. 이 난류강도분포 지도를 바탕으로 각 풍력터빈의 이격거리를 5D, 6D 그리고 7D로 늘려가며 전술한 (2) ~ (7)의 과정을 수행하였다. 그 결과 6D의 이격거리가 가장 적절한 것을 알 수 있었으며 그 배치 또한 Fig. 9에 나타내었다.

이 연구에서는 3번의 반복계산으로 적절한 지점을 찾아낼 수 있었다. 즉, 6D의 이격거리가 7D의 이격거리보다 난류강도가 낮았으므로 6D의 이격거리를 최적 배치거리로 선정하였다. 그 이유는 이격거리가 7D가 되면서 부가 난류강도의 감소량보다 주변 난류강도의 증가량이 높게 되어 유효 난류강도가 오히려 증가하였기 때문이다.

여기서 고려된 풍력단지의 경우 유효 난류강도를 줄이기 위해서 풍력시스템간의 이격거리 선정이 무엇보다도 중요하다는 것을 알 수 있다. 그러나 산악지형의 경우 거칠기가 높고 고도변

화가 심하여 단지 내에서의 주변난류강도의 변화가 심하지만, 풍력시스템간의 후류중첩효과에 의한 부가 난류강도 증가는 상대적으로 낮게 된다. 이러한 지형의 경우에는 풍력시스템간의 이격거리뿐만 아니라 고도에 따른 주변난류강도가 적은 지점으로의 위치선정도 유효난류강도를 줄이기 위해 매우 중요한 요인임을 알 수 있다.

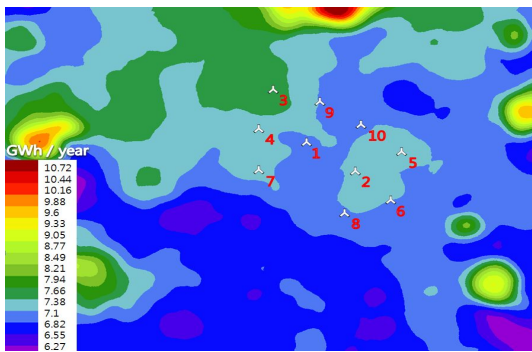


Fig. 10 Final layout on AEP at 80m a.g.l.

Fig. 10은 Fig. 9를 풍력자원지도 위에 도시한 그림이다. 각 풍력시스템의 위치에 따른 풍력자원량의 변화는 그리 크지 않아 보인다. 그러나 후류에 의한 풍속저감현상을 고려할 수 없기 때문에 풍력자원지도만 갖고 연간발전량을 분석할 수 없다.

Table 4. TI and AEP of initial layout including wake impact in the case of 15 m/s

WTG No.	Ambient TI	Added TI	Effective TI	Representative TI	AEP (MWh/year)	Wake loss
1	0.123	0.104	0.168	0.212	5726.5	-22.6
2	0.133	0.128	0.192	0.236	5815.9	-20.5
3	0.122	0.005	0.124	0.167	7293.5	-2.5
4	0.121	0.006	0.123	0.167	6913.0	-6.3
5	0.134	0.114	0.179	0.223	5681.8	-20.9
6	0.128	0.049	0.14	0.183	6053.9	-15.9
7	0.123	0.152	0.204	0.248	5444.2	-24.3
8	0.132	0.088	0.163	0.207	5647.1	-19.5
9	0.138	0.006	0.139	0.182	6721.6	-4.2
10	0.137	0.068	0.162	0.206	6159.5	-12.9
MEAN	0.1291	0.0720	0.1594	0.2031	6145.7	-14.9

Table 4는 WinPRO를 이용하여 얻은 초기배치를 기초로 Meteodyn WT에서 구할 수 있는 후류영향이 고려된 난류강도와 AEP를 정량적으로 보여준다. 난류강도는 IEC 61400-1 ed.3에서 난류강도 범위를 정할 때 사용하는 15m/s 풍속에서의 값이다.

지형고도와 표면거칠기에 의존하는 주변 난류강도의 경우 0.123~0.138범위의 값을 보여주는 반면에 이웃하는 풍력시스템으로부터 발생하는 부가 난류강도의 경우는 0.006~0.152로 상대적으로 변화폭이 크다.

Fig. 8의 WindPRO를 이용한 풍력시스템들의 초기배치를 바탕으로 각 값들을 고려해 볼 때 주풍방향으로 후방에 위치한 풍력시스템들의 부가 난류강도가 클 뿐만 아니라 후류손실도 높게 분석되고 있음을 알 수 있다.

Table 5. TI and AEP of final layout including wake impact in the case of 15m/s

WTG No.	Ambient TI	Added TI	Effective TI	Representative TI	AEP (MWh/year)	Wake loss
1	0.129	0.068	0.149	0.193	5768.4	-18.2
2	0.131	0.092	0.161	0.205	5646.8	-20.7
3	0.121	0.003	0.122	0.166	7295.8	-2.6
4	0.123	0.009	0.125	0.168	6698.3	-7.7
5	0.133	0.031	0.144	0.188	6475.8	-10.3
6	0.133	0.09	0.164	0.207	5764.4	-18.9
7	0.123	0.032	0.134	0.178	6334.0	-12.2
8	0.13	0.082	0.155	0.199	5698.2	-19.3
9	0.132	0.009	0.134	0.177	6649.1	-6.3
10	0.137	0.029	0.148	0.192	6543.5	-7.3
MEAN	0.1292	0.0445	0.1436	0.1873	6287.4	-12.3

Table 5는 Fig. 9, 10에 나타낸 것과 같이 Meteodyn WT를 이용하여 난류강도가 최소화되게 설계된 최종배치에 대한 난류강도와 AEP를 정량적으로 보여준다. 초기배치보다 7.78%의 대표 난류강도가 감소된 단지배치를 수행할 수 있었음을 알 수 있다. 감소할 것으

로 예상되었던 AEP는 오히려 2.3%증가하였는데, 그 이유는 수정 후 풍력시스템의 각 위치가 변경되었으므로, 각 위치에서의 후류특성 및 풍황특성이 달라졌고, 이로 인하여 AEP가 약간 증가하는 결과를 가져왔다고 생각된다. 주변 난류강도의 경우 증가량이 미미하며, 부가 난류강도는 확연하게 감소하였음을 알 수 있다.

풍력시스템들의 난류강도 대표 값을 보면 IEC 61400-1 ed.3에서 명시된 난류강도 등급 중 고 난류강도인 16%범위에 적합한 위치를 선정하지 못한 것을 알 수 있다. 그 이유는 가시리 풍력지구에서 사용된 기상탑 위치에서의 높은 조도계수와 오름에 의한 영향으로 측정된 데이터의 난류강도가 Fig. 4에 보이는 것처럼 원래 높게 측정되었기 때문으로 생각된다. 또한, 후류에 의한 풍속감소로 인해 발생하는 에너지손실량은 주풍향의 열방향 순으로 심해지고 있으며, 중심에 배치된 1번, 2번 풍력시스템의 후류손실이 가장 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 후류의 중첩효과로 인하여 풍속이 저감되는 현상이 증가하기 때문으로 보인다.¹²⁾

5. 결 론

CFD를 기반으로 설계 되고 복잡지형 분석에 적합한 Meteodyn WT v4.5를 이용하여 제주도 오름 및 후류의 영향을 고려한 난류강도를 분석하였다. 난류강도 지도를 생성시키고 풍력시스템의 위치를 난류강도가 낮은 위치로 변경함으로써 난류강도를 고려한 육상풍력발전지를 설계하였다. 이 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

(1) Meteodyn WT를 이용하여 지형 및 풍력시스템간의 후류영향과 난류강도도 동시에 고려하여 풍력시스템 배치를 할 수 있

었다.

(2) Meteodyn WT를 이용하여 WinPRO OPTIMIZE 모듈을 사용한 초기풍력시스템 배치보다 7.78%의 대표 난류강도가 감소하고, AEP는 2.3%증가한 풍력시스템 배치를 할 수 있었다.

(3) 복잡지형에서의 대표 난류강도를 줄이기 위해서 풍력시스템 사이의 이격거리뿐만 아니라 주변 난류강도를 줄이기 위한 위치선정이 고려되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 2009년도 산업통상자원부의 재원 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(NO.20094020200020)입니다.

참 고 문 헌

1. Korea Wind Energy Industry Association, <http://www.kweia.or.kr>.
2. Morten Nielsen, Presentation of Windfarm Assesment Tool, Riso DTU, 2011.
3. Seok-Woo Kim, Hyun-Goo Kim, Sensitivity analysis of wind resource micrositing at the antarctic king sejong station, The korean solar energy society, 2007, Vol.27, No.4, pp.1~9.
4. Rui Faria Pereira, Ricardo Andre Guedes, Carlos Silva Santos, Comparing WAsP and MeteodynWT estimates for the "regular" user, EWEC2010.
5. Anthony J. Bowen and Niels G. Mortensen, WAsP prediction errors due to site orography, Riso-R-995(EN), 2004.
6. P. J. Hurley, An evaluation of several turbulence schemes for the prediction of mean and turbulent fields in complex terrain, 1986.

7. J. R. Garratt, The atmospheric boundary layer, Cambridge Atmospheric and space sciences series, 1992.
8. Meteodyn WT, Help Facility and On-Line Documentation, Technical basis.
9. EMD International A/S, Modelling of the Variation of Air Density with Altitude through Pressure, Humidity and Temperature, WindPRO/ENERGY.
10. Sten Tronaes Frandsen, Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters, Riso National Lab., Riso-R-1188(EN), 2007.
11. Hyun-Goo Kim, Tae-Yoon Jeong, Moon-Seok Jang, Analysis on turbulence intensity characteristics at Gimnyeong, Jeju by applying IEC 61400 wind turbine standards, The Korean solar energy society, 2010, Vol.30, No.6, pp.59~65.
12. Kyung-Nam Ko, Jong-Chul Huh, Estimation of the wake caused by wind turbine and complex terrain by CFD wind farm modelling, The Korean solar energy society, 2011, Vol.31, No.5, pp.19~26.