

## 풍력발전단지 개발을 위한 풍자원 해석 및 단지 설계

변 효인<sup>1)</sup>, 류 지윤<sup>2)</sup>, 김 두훈<sup>3)</sup>

### Analysis of Wind Energy Resource & Case study for Wind Park Siting

Hyoin Byun, Jiyune Ryu, Doohoon Kim

**Key words :** Wind Park(풍력발전단지), Weibull distribution(웨이블 분포), Wind Atlas Analysis Model(풍력자원 해석 모델), Wind Energy Resource(풍력에너지 자원), Long-Term correlation(장기간 보정), WASP(Wind Atlas Analysis and Application Program, 풍력자원 해석 응용프로그램), Wind Park Siting(발전단지 설계), AEP(Annual Energy Production, 연간 에너지 생산량)

**Abstract :** This study explains the procedure that should be taken to develop a successful wind park project. It Provide guideline for activities and studies to be done step by step solution. This study follow a chronological flow through the development process. They cover Technical consideration, Assessment of Wind Energy Resource, Wind park siting and Energy yield calculation. It's build on the experience gained by the Youngduk Wind Park project and give the play a role in the development of wind energy projects. It is important to understand all theses issues if a new project is to be successfully completed.

#### Nomenclature

- $V_{\text{ave}}$  : wind speed, m/s
- $\alpha$  : wind shear exponent
- $\sigma$  : standard deviation of wind speed
- $\rho$  : air density
- $A$  : weibull scale parameter
- $c$  : weibull shape parameter
- $R$  : correlation coefficient

#### Subscrip

- WTGS : wind turbine generator system
- IEC : international electrotechnical commission
- HH : hub height[m]
- TI : turbulence intensity
- AEP : annual energy production [MWh/year]
- AWS : automatic weather station
- KMA : korea meteorological administration
- Mast : wind measuring mast

### 1. 서 론

풍력발전기술은 현재까지 가장 경제성이 있는 신재생에너지 기술이지만, 전적으로 바람에 의존함으로써, 발전전력의 양과 시스템의 효율성이 절대적으로 풍력자원 특성에 지배된다. 따라서 풍력자원의 조사 및 특성 분석은 풍력발전 시스템의 적용에 앞서 최우선적으로 수행되어야 할 부분이다. 물론 계통 연계망, 설비 및 자재 운반을 위한 도로망, 부지소유 관계 등 주변환경과 인프라 시설, 환경영향에 대한 조사를 통해 기술적 적합성 및 사업성을 검토하게 된다. 이에 따라 풍력

발전기 용량 및 수량과 기종선정, 적용방안, 최종적으로 정량적인 의미의 경제성 분석도 가능하게 된다.

본 연구에서는 영덕풍력발전단지 건설에 있어, 정밀 풍력자원 계측·분석 및 예측, 발전기 배치설계 및 에너지 생산량 계산을 수행하였으며, 풍력발전단지를 개발함에 있어 검토해야 할 기술적인 사항 및 절차를 제시하였다.

### 2. 풍력자원 계측 및 분석

#### 2.1 풍력자원의 수집 및 계측

풍력발전단지 후보지 선정에 있어 가장 중요한 요소는 단연 풍력자원 현황이다. 따라서 정확한 풍력자료의 수집은 풍력발전의 성패를 좌우하는 가장 핵심적인 과정으로 볼 수 있다.

영덕 풍력발전단지도 주변의 이용 가능한 모든 풍황 데이터를 수집하였으며, 정밀 풍력자원 계측을 위해 대상지역내에 계측기를 설치하고 국제규격인 IEC에 따라 직접 풍력자원을 계측하였다. 계측타워의 높이는 고도별 측정을 통해 실제계점보다 높은 지점의 풍속을 유추해 낼 수 있지만 기본적으로는 대상지에 설치될 풍력발전기의 HH에서 직접 측정하는 것이 바람직하며, 최소한 2/3 HH에서 측정해야 한다. 이렇게 얻어진 풍황 자료는 계측기간이 길수록 풍력자원 예측의 정확도가

- 
- 1) 유니슨주식회사 기술연구소  
E-mail : hibyun@unison.co.kr  
Tel : (41)620-3463 Fax : (041)552-7416
  - 2) 유니슨주식회사 기술연구소  
E-mail : jyryu@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3460 Fax : (041)552-7416
  - 3) 유니슨주식회사  
E-mail : kimdh@unison.co.kr  
Tel : (41)620-3456 Fax : (041)552-7416

높아지게 되는데 일반적으로 3년 이상 측정된 데이터의 경우 풍력발전단지 수명기간에 대해 95%의 정확도를 가지고 있다고 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 또한 측정기간은 최소한 4계절을 포함할 수 있도록 1년 이상이 되어야 한다. 영덕풍력발전단지에는 총 3기의 풍력자원 계측기가 설치되어 운영되었으며, 설치위치 및 계측기간 그리고 계측기의 구성은 아래와 같다.

Table 1. Description of On-site Met-mast

계측기	Mast #1	Mast #2	Mast #3
해발고도[m]	205.7	100.0	161.4
위치(X / Y)	237350	238720	237489
[TM coord.]	324079	325334	325122
측정높이[m]	15/ 29/30	20/30/40	20/30/39/40
관측기간	2000.7.6 ~2003.7.11	2000.10.11 ~2003.2.2	2002.12.24 ~현재

센서 중에서 가장 중요한 풍속계의 경우에는 일반적으로 많이 사용되는 #40의 풍속계를 이용하였다. 이 측정센서는 전기신호의 강하를 막기 위하여 조그만 교류 발전기에 의해 펄스를 발행하여 그 주파수로써 풍속신호를 측정하며, 측정범위는 1~96m/s로서 5~25m/s에서는 0.1m/s 오차의 정밀도를 가진다. 또한, 풍향센서는 일반적으로 많이 이용되는 가변저항식의 200P 모델을 이용하였다. 선형도는 최대 1.0%(일상 0.5%)를 가지며, 반응속도는 1m/s로서 작은 풍속에서도 작동한다.

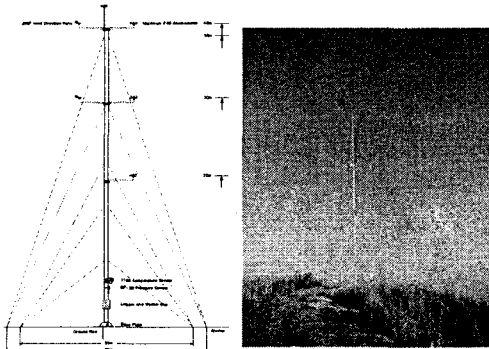


Fig 1. On-site Met-mast

Table 2. Mast #3: Sensor Characteristics

No	Description	Sensor Type	Scale	Offset	Units	Height
1	Data Logger	NRG Symponie				3m
2	NRG#40	Anemometer	0.765	0.35	m/s	40m
3	NRG#40	Anemometer	0.765	0.35	m/s	39m
4	NRG#40	Anemometer	0.765	0.35	m/s	30m
5	NRG#40	Anemometer	0.765	0.35	m/s	20m
6	NRG#200P	Direction Vane	0.351	0	degree	40m
7	NRG#200P	Direction Vane	0.351	0	degree	30m
8	Li-Co r#L200SA	Pyronometer	1.32	0	W/m <sup>2</sup>	3m
9	NRG#110S	Temp. Probe	0.138	-86.38	℃	3m
10	NRG#BP-20	Barometer	0.4255	650	mb	3m

## 2.2 풍력에너지 자원분석 및 현황

### 2.2.1 측정자료의 분석

1) 연직방향 풍속분포(Wind shear Exponent)  
대기경계층은 난류 경계층의 일종이므로 풍속 연직 분포는 로그법칙 또는 지수법칙으로 표현할 수 있으며, 간편한 지수법칙이 선호된다.

$$\text{Power-Law: } V(z) = V_r(z/z_r)^{\alpha}; \quad V_r = V(z_r)$$

$$\text{Logarithmic-Law: } V(z) = u^*/k \cdot \ln(z/z_0)$$

식에서  $V$ 는 지면고도  $z$ 에서의 풍속, 첨가  $r$ 은 참고 지점의 의미이다. 로그법칙에서  $u^*$ 은 마찰유속,  $k$ 는 von Karman 상수(=0.41),  $z_0$ 는 지면거칠기 높이이다.

### 2) 난류강도(Turbulence Intensity)

바람의 불규칙성인 난류는 전력생산 저하 및 시스템 하중 증가를 초래할 수 있으므로 특성파악이 매우 중요하다. 국제규격 IEC에서는 15m/s에서의 난류강도 특성에 따라 풍력발전기의 Type Class를 구분하고 있다.

$$\text{Turbulence Intensity: } TI = \frac{\sigma}{\bar{V}}$$

### 3) 공기밀도(Air Density)

풍력자원은 에너지밀도(Power Density)로 평가할 수 있으며, 에너지밀도  $P[W/m^2]$ 는 풍속의 세제곱과 공기 밀도에 비례하는 적분식으로 정의된다. 따라서 대상지역의 풍력자원 분석을 위해서는 공기밀도의 계산이 필요하다. 공기밀도는 기온과 기압으로 나타낼 수 있다

$$\text{Air Density: } \rho = \frac{P}{RT} \quad [kg/m^3]$$

여기서,  $P$  = Air Pressure(Pa or N/m<sup>2</sup>)

$R$  = Specific gas constant for air

$T$  = Air temperature in degrees Kelvin

만약, 대상지역의 기압 정보가 없다면, 해발고도와 기온으로 다음과 같이 계산된다.

$$\rho = \left( \frac{P_0}{RT} \right) \exp \left( \frac{-gz}{RT} \right) \quad [kg/m^3]$$

여기서,  $P_0$  = Standard sea level atmospheric pressure(101,325Pa)

$g$  = Gravitational constant(9.8m/s<sup>2</sup>)

$z$  = Site elevation above sea level

$$\text{따라서, } \rho = \left( \frac{353.05}{T} \right) \exp \left( -0.004 \left( \frac{z}{T} \right) \right) \quad [kg/m^3]$$

으로 다시 나타낼 수 있다.

### 4) 풍속 확률밀도 함수(Weibull distribution)

풍속별 출현 빈도를 나타내는 풍속 확률밀도 함수  $f(V)$ 는 풍속분포의 평균값을 나타내는 형상계수( $C$ )와 풍속분포 편차의 크기를 나타내는 등급계수( $k$ )로 간략하게 표현되는 Weibull 분포를 적용하여 다음과 같이 계산된다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right\}$$

### 5) 측정지점간 상관분석(Correlation)

측정지점간 풍력자원의 상관관계의 파악은 매우 중요한 실제적인 의미를 갖는다. 일반적으로 풍력발전의 효율성 및 운영 편의성을 위해서는 풍력단지 전체가 동일한 국지풍계에 포함되는 것이 유리하기 때문이다.

또한, 대상지역에서 계속된 자료는 1~3년 동안의 자료이며, 풍력발전단지는 20년간 가동될 것이므로 수집된 풍향자료에 장기간에 걸친 기후 변화를 반드시 감안해야 한다. 즉 가장 인근의 기상측정소 등의 10년 이상 장기간 계속자료를 외삽(Extrapolation)하여 예측함으로써 실제 측정기간의 단기성에 의한 한계를 극복하고, 실제 풍력자원 예측에 반영하는데 이러한 작업을 장기간 풍속보정(Long term correlation)이라고 한다.

본 연구에서는 측정지점간 상관도의 정량화의 척도로 피어슨 상관계수를 이용하였다.

$$R_{x,y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

여기서,  $\bar{x}, \bar{y}$  : 각각  $x, y$ 의 평균값

$\sigma_x, \sigma_y$  : 각각  $x, y$ 의 표준편차

### 2.2.2 풍력에너지 자원현황

영덕풍력발전단지 내에서 계속된 풍력자원 계측결과와 계측기별 월평균 풍속은 Table3, Fig2.와 같다.

앞서 언급한 바와 같이, 대상지역에서 계속된 풍력자원 데이터의 상관관계를 분석하였으며, 계속기간이 가장 긴 Mast#1을 기준으로 Mast#2와는 0.933, Mast#3와는 0.982로 매우 높은 상관관계를 나타내어, 모두 동일한 국지풍계에 의해 지배됨을 알 수 있다.

Table 3. Survey of Measured Wind Data

Item	Mast#1	Mast#2	mast#3
Measurement Height [m]	30	40	40
Data Interval [min]	60	10	10
Mean Wind Speed $V_{ave}$ [m/s]	6.1	6.9	5.7
Height Coefficient(Wind shear factor)	0.13	0.15	0.08
Weibull shape parameter k	1.98	1.98	2.11
Weibull scale parameter A	6.9	7.8	6.5
Max. 10min average at measured height [m/s]	32.0	28.9	34.6
Max. 10min average at Hub height(calculated) [m/s]	35.5	32.0	37.6
Max gust(3sec. average) at Hub height [m/s]	49.7	44.8	52.6
Turbulence Intensity at Measured height $I_{15}$ [%]	16.9	11.3	16.8
Temperature range [°C]	-15°C to 30°C		

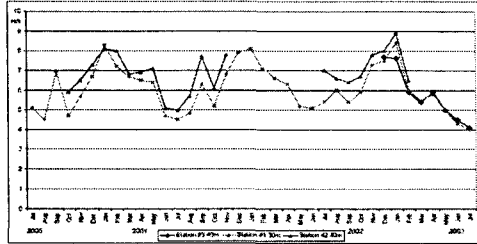


Fig 2. Monthly mean wind speed for highest sensor

한편, 장기간 풍속보정을 위하여 Table4.와 같이 기상청 데이터를 수집하여, mast#1 실측데이터와 상관관계를 구하였다. 그러나, 상관계수 및 Fig3.의 풍속변화 경향에서처럼 상관관계가 극히 작아, 영덕풍력발전단지의 에너지 생산량 계산에서는 장기간 풍속보정에 대한 영향을 배제하였다.

Table 4. List of Long-term wind measurement station

계측지점	해발고도[m]	센서높이[m]	계측기간
영덕(AWS#277)	41.2	10.0	13 year
의성(KMA#278)	81.1	13.8	13 year
포항(KMA#138)	3.9	7.0	13 year

Table 5. Correlation coefficient for long-term data & Mast#1

	포항	영덕	의성
포항(KMA#138)	-	-	-
영덕(AWS#277)	0.340	-	-
의성(KMA#278)	0.440	0.738	-
Mast#1	0.448	0.649	0.402

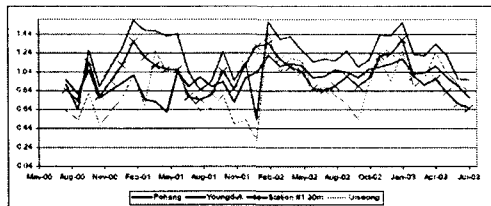


Fig 3. Standardized long-term data & mast#1, time response

### 3. 풍력자원 예측 및 단지설계

#### 3.1 풍력자원 예측

풍력자원의 예측이란 대상부지 또는 외부의 한정된 지점에서 계측된 풍속자료를 바탕으로 지형형상, 지표면 거칠기와 토지 이용상태 등을 고려하여 통계적 또는 수치 해석적 방법을 통해서 대상지역 전체의 풍력자원을 예측하는 것이다.

영덕풍력발전단지의 풍력자원 예측에는 통계적 분석 기법으로, 가장 널리 사용되고 있는 덴마크 RISØ 연구소의 WASP을 이용하였다. WASP은 Troen(1990)의 BZ모

델과 지형분석 프로그램을 통해, 분석지점에서의 유풀, 섭동 profile을 얻는다. 사각격자가 아닌 원형 격자를 사용하며, 풍속과 풍향 측정데이터는 원주방향의 색터에 저장된다. WASP은 이렇게 저장된 데이터와 계산영역의 지형, 건물과 식생에 의해 결정되는 표면거칠기, Wake effect를 발생시키는 장애물의 영향을 고려하여 예측을 수행한다. Fig4.는 WASP의 계측 데이터로부터 예측을 수행키 위한 입력자료 및 과정이다.

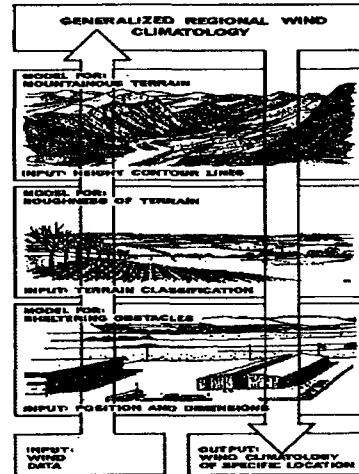


Fig 4. Wind Atlas methodology of WASP

대상지역 전체를 아우르는 풍력자원 예측결과와 풍력발전단지의 에너지 생산량을 계산할 수 있도록 각 방위별 Weibull Factor 및 Wind Rose값으로 도출하였다. 다음 Fig5.은 Mast#1 지점의 실측 데이터를 근거로 예측한 Hub Height 80m의 풍속 분포함수와 바람장미를 나타내었다

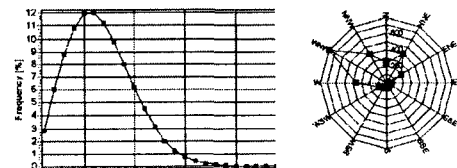


Fig 5. Weibull distribution & Wind rose at Mast#1

또한, 격자별로 예측된 값을 선형 보간하여 대상지역 전체에 대한 풍력에너지 자원 지도를 작성하였다.

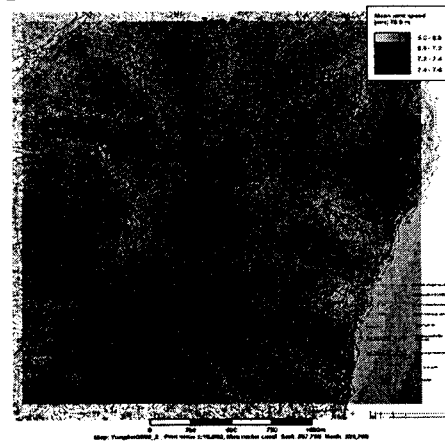


Fig 6. Wind energy resource map of Youngduk windpark

### 3.2 발전단지 배치설계

풍력에너지 자원 예측결과를 통해 대상지역 내에서 에너지 생산량이 최대화될 수 있도록 풍력발전기 배치를 최적화 한다. 풍력발전기 배치 설계 시에는 다수의 풍력발전기 기종에 대해 고려하여 대상지역의 풍황 및 기후 조건에 가장 적합한 기종의 선정이 필요하다. 이러한 기종별 에너지 생산량의 계산은, 기종선정은 물론 사업의 경제성을 판단하기 위한 가장 직접적인 인자이기 때문에 출력곡선과 같은 풍력발전기에 대한 정확한 정보가 필요하다.

영덕풍력발전단지의 풍력발전기 배치설계에는 상용 프로그램인 WindPro Ver2.4를 이용하여, 유럽의 표준으로 인식되고 있는 WASP을 통해 에너지 생산량 계산을 수행하였다. 풍력 발전기는 NEG-Micon사의 NM82C를 모델로 하여 풍력자원 계측기 3기의 결과를 각각 반영하여 계산을 수행하였다.

또한, 에너지 생산량 계산에 있어서, 풍력자원의 계측, 지형수치모델, 해석 모델링 및 장기간 풍속보정 등에서 불확도(Uncertainty)가 발생할 수 있으며, 송전 및 이용률에 의한 손실도 고려하였다.

Table 6. Uncertainties for Youngduk windpark project

Source	Uncertainty
Anemometer calibration	2.0%
Anemometer characteristics	0.5%
Mounting error	1.0%
Data recording	0.1%
Terrain description	1.0%
Flow modeling	5.0%
Long-term correlation	5.0%
Total Uncertainty	7.5%

Table 7. Deviation of energy due to wind uncertainties

평균풍속	풍속편차	A-Factor	C-Factor	불확도
7.06	0.0%	7.95	1.95	0.0%
6.53	7.5%	7.34	1.95	13.1%

Table6. 및 7과 같이 풍력자원 계측 및 모델링, 해석 등에서 발생 가능한 불확도는 7.5%로서, 계측기 3기에 의해 예측된 Hub Height 80m에서의 풍속 7.06m/s에 불확도를 반영하면, 에너지생산량에는 13.1%의 불확도를 유발시킨다. 물론, 발전기 자체의 출력성능에도 불확도(5%)가 있으므로 에너지 생산량에 반영하여, 총 불확도는 14%를 반영하였다. 또한, 송전손실(2%) 및 이용률(97%)을 고려하여, 최종적인 에너지생산량은 106,769MWh/year로 계산되었다.

그러나, 불확도의 요인들이 동시에 발생될 수는 없으므로, 확률해석을 통해, 최종적인 영덕풍력발전단지의 에너지생산량을 예측하였다.

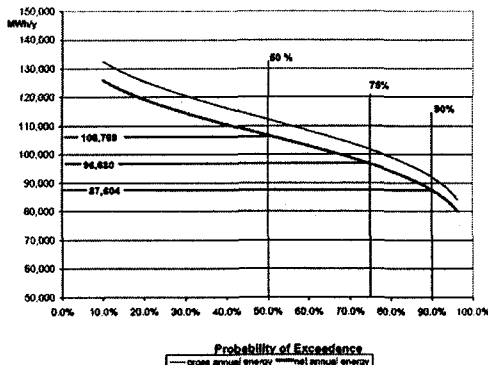


Fig 7. Probability of exceeding different gross and net energy yield for 14% uncertainty of energy calculation

### 4. 결론

본 연구에서는 영덕풍력발전단지의 풍력자원 분석 및 에너지 예측의 과정과 결과 그리고 발전단지 배치설계에 따른 에너지 생산량 계산의 적용사례를 소개하였다.

풍력자원 분석 및 에너지 생산량 계산에 따르면, 영덕풍력발전단지는 Hub Height 80m 기준, 발전기 배치 지점에서의 평균풍속은 6.9m/s이며, 주풍향은 북북서를 나타내었다. 또한, 1.65MW급 풍력발전기 24기, 총 39.6MW 기준 112,318MWh/y의 에너지 생산량이 예측되나, 불확도 발생확률을 75%로 고려하고 손실을 적용하면, 96,680MWh/y의 에너지 생산이 예측된다.

2005년 4월, 영덕풍력발전단지는 단지건설을 마치고, 상업발전을 개시하였다. 향후, 에너지 생산량의 예측값과 실제 생산량의 비교연구를 통한 방법론적 검증이 요구되나, 앞으로 풍력자원 분석, 에너지생산량 예측 및 발전단지 설계에 있어 본 연구가 활용되기를 기대한다.

### References

- [1] 2003. "Wind Data and Energy Report for youngduk Wind Park project", Unison
- [2] "European best practice guidelines for wind energy development", EWEA
- [3] 1997, "Wind resource assessment handbook", NREL
- [4] 2002, "Wind monitoring and longterm correlation", Mangaia grid connected wind power feasibility study
- [5] 2001, "The Numerical Wind Atlas-The KAMM/WASP Method", H/P. Grank et. RISO,
- [6] 2001, "Report on the Analysis of the wind conditions at the site Aqaba, Jordan", DEWI
- [7] 2003, "국내풍력발전단지 개발절차 및 표준 가이드라인 제정의 필요성", 김두훈, 류지윤, 홍승기, 풍력기술연구회 한국풍력기술 및 정책 원샷, 42-49p.