

풍력자원해석 및 에너지예측을 통한 풍력발전단지 설계 연구

변효인*, 류지윤, 김두훈

The Study of the Wind Resource and Energy Yield Assessment for the Wind Park Development

Hyoin Byun, Jiyune Ryu, Doocheon Kim

Abstract This study explains the procedure that should be taken to develop a successful wind park project. It provides a guideline for the activities and studies to be done as a step by step solution. This study follows a chronological flow throughout the whole development process. This paper covers technical consideration, assessment of wind energy resource, wind park siting and energy yield calculation. This presented knowledge has been mostly gained by the experience from Youngduk wind park project. The further comparison study will be performed between the theoretical prediction and the actual yield of the Youngduk wind park.

Key words Wind park(Wind farm, 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)

* 유니슨주식회사 기술연구소

■ E-mail : hibyun@unison.co.kr ■ Tel : (041)620-3463 ■ Fax : (041)552-7416

1. 서론

근래 들어 신재생에너지 분야에서 가장 많이 이용되는 분야인 풍력발전은 여러 기의 풍력발전기를 하나의 사업권역에 설치하여 대규모 발전 플랜트 역할을 하는 풍력발전단지의 개발과 건설을 통해 활성화됨으로써, 현재 전 세계적으로 47,912MW의 풍력발전 설비가 보급되어 있으며, 2009년에는 117,142MW가 보급될 것으로 예측되고 있다. 국내에는 현재 제주도(행원 9.8MW, 남부발전 한경 6MW)와 내륙지역(영덕 39.6MW)등이 중소규모 풍력발전단지가 건설되어 있다.

풍력발전단지를 개발하기 위해서는 사업대상지역의 풍력자원 분석, 풍력발전기의 정밀 배치설계, 풍력발전기 기종선정, 전력연계 설계, 환경영향 평가, 지질조사, 토목설계 및 경제성 분석과 위험도 분석 등의 타당성 연구 수행이 필요하다. 이 중, 풍력발전단지 개발에서 가장 우선적으로 수행되어야 하는 분야는 풍력자원의 분석과 평가, 최적의 풍력발전기 기종선정, 발전단지 정밀 배치설계(Micro-siting) 등을 통한 신뢰성 있는 예상 전력생산량 계산 및 최적의 발전설비 용량 계산 등의 엔지니어링 분야이다.

본 연구에서는 현재 운용되고 있는 영덕풍력발전단지의 사

레 연구를 통해 풍력발전단지 건설에 필요한 풍력자원의 분석과 발전단지의 정밀 배치설계 및 전력생산량 예측기법을 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.

정밀 풍력자원 계측을 위한 계측타워의 높이는 고도별 측정을 통해 실제측점보다 높은 지점의 풍속을 유추해 낼 수 있지만 기본적으로는 대상지에 설치될 풍력발전기의 HH에서 직접 측정하는 것이 바람직하며, 최소한 2/3HH에서 측정해야 한다. 이렇게 얻어진 풍향 자료는 계측기간이 길수록 풍력자원 예측의 정확도가 높아지게 되는데 일반적으로 3년 이상 측정된 데이터의 경우 풍력발전단지 수명기간에 대해 95%의 정확도를 가지고 있다고 알려져 있다. 또한 측정기간은 최소한 4계절을 포함할 수 있도록 1년 이상이 되어야 한다.

영덕풍력발전단지에는 총 3기의 풍력자원 계측기가 설치되어 운영되었으며, 설치위치 및 계측기간 그리고 계측기의 구성은 Table 1과 같다.

센서 중에서 가장 중요한 풍향·풍속계는 일반적으로 많이 사용되는 NRG #40의 풍속계를, NRG 200P 풍향계를 이용하였다.

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 | 324079 | 238720 |
| [TM coord.] | 325334 | 237489 | 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 |
| 설치·운영자 | KIER | POSTECH | UNISON |

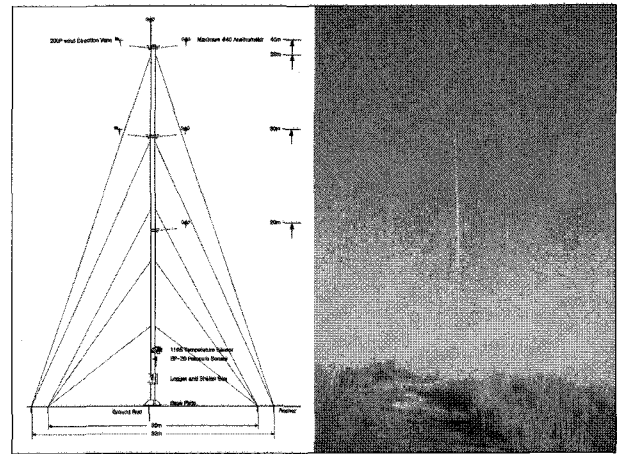


Fig. 1 On-site Met-mast.

2.2 풍력에너지 자원분석 및 현황

2.2.1 측정자료의 분석

1) 연직방향 풍속분포(Wind shear exponent)

대기경계층은 난류 경계층의 일종이므로 풍속 연직분포는 로그법칙 또는 지수법칙으로 표현할 수 있으며, 간편한 지수법칙이 선호된다.

Table 2. Mast #3: Sensor characteristics

| No | Description | Sensor Type | Scale | Offset | Units | Height |
|----|----------------|----------------|--------|--------|------------------|--------|
| 1 | Data Logger | NRG Symphonie | | | | 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 ² | 3m |
| 9 | NRG#110S | Temp. Probe | 0.138 | -86.38 | °C | 3m |
| 10 | NRG#BP-20 | Barometer | 0.4255 | 650 | mb | 3m |

Power-Law : $V(z) = V_r (z/z_r)^a ; V_r = V(z_r)$

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

식에서 V 는 지면고도 z 에서의 풍속, 첨자 r 은 참고지점을 의미한다. 로그법칙에서 u^* 은 마찰유속, k 는 von Karman 상수 (=0.41), z_0 는 지면 거칠기 높이이다.

2) 난류강도(Turbulence intensity)

바람의 불규칙적인 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.

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

3) 공기밀도(Air density)

풍력자원은 에너지밀도(Power density)로 평가할 수 있으며, 에너지밀도 $P[W/m^2]$ 는 풍속의 세제곱과 공기밀도에 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^2)

R = Specific gas constant for air

T = Air temperature in degrees Kelvin

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

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

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

g = Gravitational constant(9.8m/s²)

z = Site elevation above sea level

$$\text{따라서, } \rho = \left(\frac{353.05}{T} \right) \exp^{-0.034 \left(\frac{z}{T} \right)} \quad [kg/m^3]$$

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) 측정지점 간 상관분석(Correlation)

측정지점 간 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 풍향 자료에 장기간에 걸친 기후 변화를 반드시 감안해야 한다. 즉 가장 인근의 기상 관측소 등의 10년 이상 장기간 계속자료를 외삽(Extrapolation)하여 예측함으로써 실측기간의 단기성에 의한 한계를 극복하고, 실제 풍력자원 예측에 반영하는데 이러한 작업을 장기간 풍속보정(Long-term correlation)이라고 한다.

본 연구에서는 측정지점 간 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

σ_x, σ_y : 각각 x, y 의 표준편차

2.2.2 풍력에너지 자원현황

영덕풍력발전단지 내에서 계속된 풍력자원 계속결과와 계속기별 월평균 풍속은 Table 3 및 Fig. 2와 같다.

앞서 언급한 바와 같이, 대상지역에서 계속된 풍력자원 데이터의 상관관계를 분석하였으며, 계속기간이 가장 긴 Mast#1을 기준으로 Mast#2와는 0.933, Mast#3과는 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_{10} [%] | 16.9 | 11.3 | 16.8 |
| Temperature range[°C] | -15°C to 30°C | | |

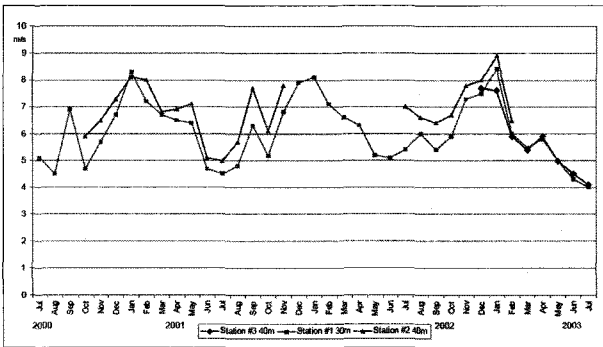


Fig. 2 Monthly mean wind speed for highest sensor.

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 |

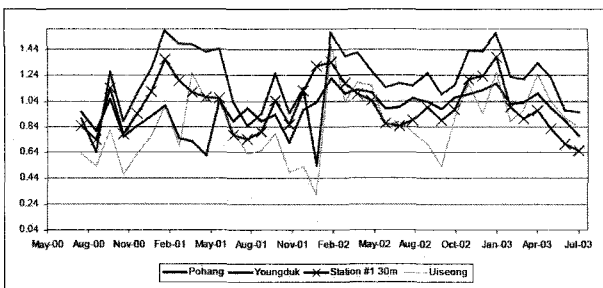


Fig. 3. Standardized long-term data & mast#1, time response.

한편, 장기간 풍속보정을 위하여 Table 4와 같이 기상청 데이터틀 수집하여, mast#1 실측데이터와 상관관계를 구하였다. 그러나, 상관계수 및 Fig. 3의 풍속변화 경향에서처럼 상관관계가 극히 작아, 영덕풍력발전단지의 에너지 생산량 계산에서는 장기간 풍속보정에 대한 영향을 배제하였다.

3. 풍력자원 예측 및 단지설계

3.1 풍력자원 예측

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

영덕풍력발전단지의 풍력자원 예측에는 통계적 분석기법으로, 가장 널리 사용되고 있는 덴마크 RISØ 연구소의 WAsP을

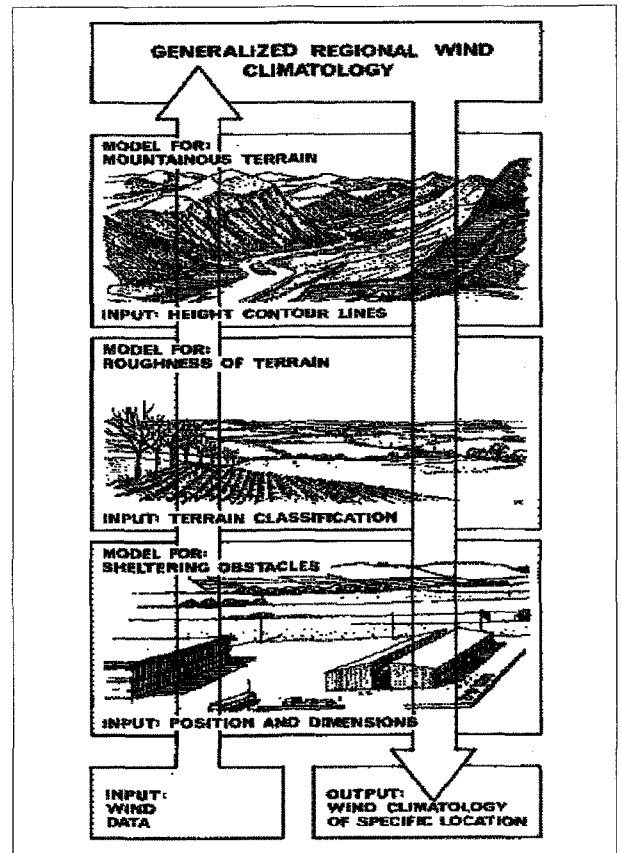


Fig. 4 Wind atlas methodology of WAsP.

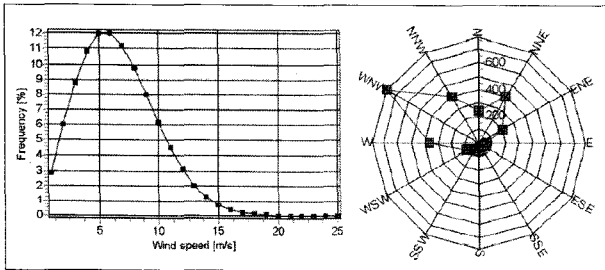


Fig 5. Weibull distribution & Wind rose at Mast#1.

이용하였다. WAsP은 Troen(1990)의 BZ모델과 지형분석 프로그램을 통해, 분석지점에서의 유동, 섭동 profile을 얻는다. 사각격자가 아닌 원형 격자를 사용하며, 풍속과 풍향 측정데이터는 원주방향의 섹터에 저장된다. WAsP은 이렇게 저장된 데이터와 계산영역의 지형, 건물과 식생에 의해 결정되는 표면거칠기, Wake effect를 발생시키는 장애물의 영향을 고려하여 예측을 수행한다. Fig. 4는 WAsP의 계측 데이터로부터 예측을 수행기 위한 입력자료 및 과정이다.

대상지역 전체를 아우르는 풍력자원 예측결과는 풍력발전단지의 에너지 생산량을 계산할 수 있도록 각 방위별 Weibull Factor 및 Wind Rose값으로 도출하였다.

위의 Fig. 5는 Mast#1 지점의 실측 데이터를 근거로 예측한 Hub Height 80m의 풍속 분포함수와 바람장미를 나타내었다

또한, Fig. 6과 같이 격자별로 예측된 값을 선형 보간하여 대상지역 전체에 대한 풍력에너지 자원 지도를 작성하였다.

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 기종을 검토하여 대상지역의 풍향 및 기후 조건에 가장 적합한 기종의 선정이 필요하다. 이러한 기종별 에너지 생산량의 계산은, 기종 선정은 물론 사업의 경제성을 판단하기 위한 가장 직접적인 인자이기 때문에 출력곡선과 같은 풍력발전기에 대한 정확한 정보가 필요하다.

영덕풍력발전단지의 풍력발전기 배치설계에는 상용프로그램인 WindPro Ver.2.4를 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, 에

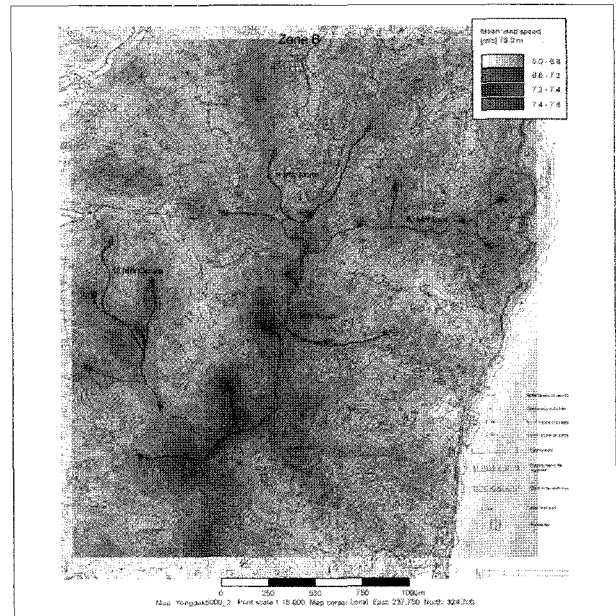


Fig. 6 Wind energy resource map of Youngduk windpark.

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 | C-Factor | k-Factor | 불확도 |
|------|------|----------|----------|-------|
| 7.06 | 0.0% | 7.95 | 1.95 | 0.0% |
| 6.53 | 7.5% | 7.34 | 1.95 | 13.1% |

너지 생산량 계산에 있어서, 풍력자원의 계측, 지형수치모델, 해석 모델링 및 장기간 풍속보정 등에서 발생가능한 불확도(Uncertainty)와 송전 및 이용률에 의한 손실도 고려하였다.

Table 6 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 14.02%가 발생한다.

발전단지의 지형조건(Terrain 및 roughness)과 발전기 배

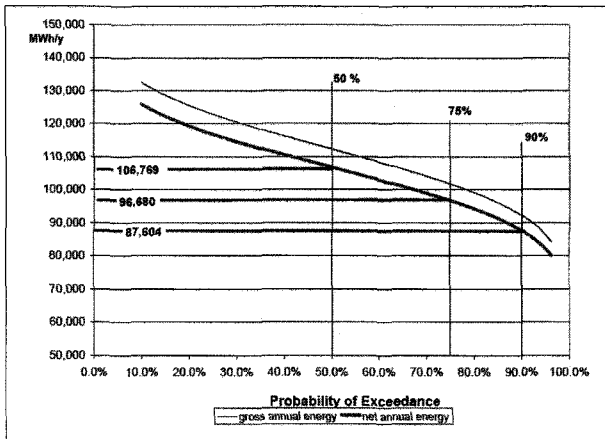


Fig. 7 Probability of exceeding different gross and net energy yield for 14% uncertainty of energy calculation.

치에 따른 배치손실만을 고려한 순수 에너지 생산량은 112,318 MWh/year로 예측되었다. 여기에 송전손실(2%) 및 이용률(97%)을 고려하여, 최종적인 에너지생산량은 106,769 MWh/year로 계산되었다. 그러나 불확도의 요인들이 발현될 수 있으므로, 불확도 발생 신뢰도 해석을 통하여 Fig. 7과 같이 최종적인 영덕풍력발전단지의 에너지생산량을 예측하였다.

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 배치지점에서의 평균풍속은 6.9m/s이며, 주 풍향은 북북서를 나타내었다. 또한, 1.65MW급 풍력발전기 24기, 총 39.6MW 기준 112,318MW/y의 순수 에너지 생산량이 예측되나, 손실을 적용하고, 신뢰도 75%를 적용하면, 96,680 MW/y의 에너지 생산량이 경제성 분석의 입력 자료로 사용되었다.

향후, 영덕풍력발전단지의 에너지 생산량 예측 값과 실제 생산량의 비교연구를 통해, 예측모델의 검증은 수행할 계획이다. 앞으로 풍력자원 분석, 에너지생산량 예측 및 발전단지 설계에 있어 본 연구가 활용되기를 기대한다.

Nomenclature

- V_{ave} : wind speed, m/s
- a : wind shear exponent
- σ : standard deviation of wind speed
- ρ : air density
- C : weibull scale parameter
- k : weibull shape parameter
- R : correlation coefficient

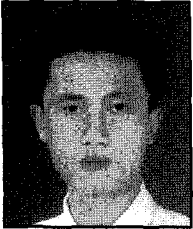
Abbreviation

- 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

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 표준가이드라인 제정의 필요성", 김두훈, 류지윤, 홍승기, 풍력기술연구회 한국풍력기술 및 정책 워크샵, 42~49p.

변효인



1998년 인하대학교 선박해양공학과 공학사
2000년 인하대학교 선박해양공학과 공학석사
2004년 인하대학교 선박해양공학과 공학박사

현재 유니슨 기술연구소 풍력개발팀 전임연구원
(E-mail : hibyun@unison.co.kr)

류지윤



1990 영남대학교 기계공학과 공학사
1992 영남대학교 기계공학과 공학석사

현재 유니슨 기술연구소 풍력개발팀 수석연구원
(E-mail : jyryu@unison.co.kr)

김두훈



1982 서울대학교 기계설계공학과 공학사
1984 한국과학기술원 기계공학과 공학석사
1991 호주 Manash University 기계공학과 공학박사

(E-mail : kimdh@unison.co.kr)