

우리나라 지형특성을 고려한 풍력발전 타당성 연구

문채주*, 정의현*, 심관식**, 정권성*, 장영학***

*목포대학교 전기공학과(cjmoon@mokpo.ac.kr)
**목포대학교 신재생에너지기술연구센터(simgong@ieee.org),
***목포대학교 제어시스템공학과(yhchang@mokpo.ac.kr),

Feasibility study of wind power generation considering the topographical characteristics of Korea

Moon, Chae-Joo*, Cheang, Eui-Heang*, Shim, Kwan-Shik**, Jung, Kwen-Sung*, Chang, Young-hak***

*Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(cjmoon@mokpo.ac.kr),
**Research Center for New & Renewable Energy Technology, Mokpo National
University(simgong@ieee.org),
***Dept. of Control System Engineering, Mokpo National University(yhchang@mokpo.ac.kr)

Abstract

This paper discussed the Feasibility study of wind power generation considering the topographical characteristics of Korea. In order to estimate the exact generation of wind power plants, we analyzed and compared wind resources in mountain areas and plain areas by introducing not only wind speed, the most important variable, but also wind distribution and wind standard deviation that can reflect the influence of landform sufficiently. According to the results of this study, generation was almost the same at wind power plants installed in southwestern coastal areas where wind speed was low as at those installed in mountain areas in Gangwondo where wind speed was high. This demonstrates that the shape parameter of wind distribution is low due to the characteristics of mountain areas, and the standard deviation of wind speed is large due to the effect of mountain winds, therefore, actual generation compared to southwestern coastal areas is almost similar in mountain areas even though wind speed is high.

Keywords : 풍력발전단지(wind generation farm), 에너지밀도(energy density), 풍속확률밀도(wind probability density), 웨이블분포(Weibull distribution), 난류강도(turbulence intensity), 바람장미(wind rose)

1. 서 론

최근 세계적으로 유류 가격 급등과 온난화 문제로 신재생에너지에 대한 관심 증폭되고 있다. 현재까지 다양한 신재생에너지원 중에서 가장 현실적인 대안으로 받아들여지고 있는 풍력발전은 공기의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 것이다.

현재 국내 풍력발전기술은 100MW급 풍력발전단지를 설계, 운영할 수 있을 정도로 급성장하였으며 새로운 대용량 발전단지 설계와 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

풍력발전기술 중에서 바람자원의 계측과 분석을 포함한 정밀한 평가기술은 풍력발전단지의 성패를 좌우할 수 있는 하나의 요소이다. 풍력발전기의 설치 지역에서 기본적으로 고려해야 할 것은 설치지역의 풍속, 풍향 조건 그리고 돌풍이나 난류발생 등을 우선 고려해야 한다.

현재 우리나라 바람자원 평가는 지역별로 국지적으로 수행되고 있고^{1)~5)} 국토전체에 대한 바람자원의 비교 평가를 수행한 결과는 발표되지 않고 있다.

풍력발전에서 가장 중요한 변수는 풍속이다. 바람의 운동에너지는 풍속의 3승에 비례하여 전기에너지로 변환되기 때문이다. 이를 바탕으로 우리나라에서 바람이 거센 지역인 제주지역과 강원, 경북 산간지역에 주로 대용량 풍력발전단지가 건설되었다. 또한 향후 이들 지역을 중심으로 다수의 풍력발전단지 건설이 예정되어 있다. 그러나 우리나라와 같은 산악지형에서 풍력발전은 풍속뿐만 아니라 지형의 영향을 반영할 수 있는 분석이 병행되어야 적절한 발전량을 산정할 수 있으므로 산악지역에 대한 신규 풍력발전단지 건설은 신중히 고려해야 한다.

이 논문에서는 우리나라 지형특성을 고려하여 발전량을 비교 평가하였다. 실측한 바람자원에 대한 기본적인 분석과 함께 확률밀

도함수와 평균표준편차를 사용하여 강원 산악지역의 바람자원과 비교적 평지인 서남해안 지역에서 실측한 바람자원으로부터 예상발전량을 계산하고 우리나라 지형 특성을 고려한 풍력발전단지의 타당성을 평가하였다.

2. 바람자원 계측과 분석 기술

2.1 바람자원 계측기술

정확한 풍력자원의 계측은 풍력발전단지를 선정하거나 설계하는데 있어 가장 기초적이며 중요한 기술 중에 하나이다.

예상풍력단지의 다수의 장소에 계측타워를 설치하고 각 계측기를 발전기가 설치될 높이에 설치하여 바람자원을 실측하는 것이 가장 이상적이다.

현실적으로는 계측 비용문제를 고려하여 50m 높이 전후의 계측타워를 설치하고 높이 20m ~ 50m 사이에 다수의 계측기를 설치하여 높이별 바람자원을 계측한다.

보통 계측기간은 사계절의 영향을 반영하여 최소 1년 이상 계측되어야 하는데, 계측기간이 길수록 풍력자원예측의 정확도가 높아진다.⁶⁾

계측타워에 설치되는 계측기에는 풍향센서와 풍속센서가 내장되어 있고, 이들 센서에서 실측한 데이터를 데이터 logger에 저장하거나 CDMA와 같은 통신을 이용하여 원격으로 바람자원을 실측한다.

2.2 바람자원 분석기술

(1) 기초 분석 기술

계측기에서 취득한 이산치 형태의 바람자원으로부터 풍력단지선정과 설계를 하는데 있어서 기초적인 바람자원 분석기술이 필요하다.

측정된 바람자원에서 가장 기본적으로 수행하는 것은 발전기가 설치될 높이의 보정풍속 (correction wind speed)을 구하는 것이

다. 예를 들면 50m 이하의 몇 개의 실측데이터를 이용하여 80m의 풍속을 예측하는 것으로 보정풍속은 보간법을 적용하여 구할 수 있다. 그러나 높이별 풍속이 지수함수특성을 가지고 있으므로 간단하게 식 (1)과 같은 지수법칙을 적용하여 보정풍속을 예측하는 것이 일반적으로 사용되고 있다.⁷⁾

$$V_s = V_r \left(\frac{s}{r} \right)^\alpha \quad (1)$$

식 (1)에서 V_s 와 V_r 은 각각 보정풍속과 실측풍속을 의미하고 s , r 은 각각 보정높이와 실측높이를 나타낸다.

유체와 함께 대표적인 불규칙 난류 중에 하나인 바람이 가지고 있는 에너지를 예측하는데 있어 난류강도(turbulence intensity)는 필수적이다. 특히 우리나라와 같이 산악지형에 풍력발전단지를 설계할 때, 난류강도는 발전단지의 성능에 중요한 변수가 될 수 있다. 보통 난류강도는 식 (2)와 같이 표준편차를 평균풍속으로 나눈 값으로 정의한다.⁷⁾

$$T_i = \frac{\sigma}{V_s} \quad (2)$$

지금까지 기술한 풍속분포, 난류강도와 함께 바람자원이 가지고 있는 에너지밀도를 계산해야한다. 에너지밀도는 풍력발전기에서 변환되는 에너지의 양으로 정의된다. 바람자원이 가지고 있는 에너지밀도는 식 (3)으로 계산할 수 있다⁷⁾

식 (3)에서 ρ , A 는 각각 공기밀도와 블레이드넓이를 의미하며 V_s 는 평균풍속을 의미한다.

$$\int_0^\infty \frac{1}{2} \rho V_s^3 dV_s \quad (3)$$

(2) 풍속확률밀도(Weibull distribution)

풍속확률밀도란 실제 측정된 풍속에서 각

풍속대별 출현 빈도를 나타내는 것이다. 풍력자원분석에 보통 2변수의 Weibull 분포함수와 단변수의 Rayleigh 분포함수를 사용한다. Weibull 분포함수를 적용하여 나타낼 수 있는 풍속확률밀도함수는 풍속분포의 평균값을 나타내는 형상계수(k)와 풍속분포의 편차크기를 나타내는 척도계수(c)를 이용하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.⁷⁾

$$f(V_s) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_s}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \frac{V_s}{c^k} \right] \quad (4)$$

식 (4)에서 척도계수를 일정하게하고, 형상계수가 증가하면 풍속확률밀도함수는 특정 풍속구간에서 밀도분포가 높아진다. 반면 형상계수가 일정하고 척도계수가 증가하면 풍속밀도함수는 최대밀도 분포풍속이 높아진다. 그러므로 동일한 평균 풍속에 대해서 형상계수가 클수록 좋은 바람자원을 가지고 있다고 평가할 수 있다.

가장 이상적인 것은 척도계수가 크고 동시에 형상계수가 큰 경우로 최고점의 풍속이 크고 최고점 근처 풍속의 분포율이 커지기 때문에 바람자원에 포함된 에너지가 크다고 할 수 있다.

(3) 풍속표준편차

시간대별 풍속표준편차는 평균풍속에 대한 각 시간대별 풍속의 변화를 의미한다. 즉 시간대별 풍속의 변화 정도를 산술적으로 예측하는 것으로 풍속표준편차가 크면 클수록 바람의 변화가 크다는 것을 의미한다. 따라서 시간대별 풍속표준편차는 어느 정도 난류의 영향과 함께 지형적 특성인 산풍과 돌풍의 영향을 반영하고 있다.

식 (5)에서 δ_m 은 각 측정데이터의 표준편차이고 σ_t 는 시간대별 풍속표준편차이다.

$$\sigma_t = \sum_{m=1}^{60} \delta_m \quad (5)$$

3. 국내바람자원특성과 풍력발전단지

우리나라는 국토의 65%가 산지로 구성되어 있고 태백산맥과 소백/노령산맥을 중심으로 고산지대가 형성되어 있다.

우리나라 주요 바람자원은 북서풍과 남동풍이고 계절에 따라서 영동, 영서 지방에 고온 건조한 바람인 높새바람이 분다. 또한 산악지형에서는 밤과 낮의 기온 차에 의해서 산풍인 골바람과 산바람이 분다.

현재 우리나라에 50MW 이상 풍력발전 단지는 강원도와 제주도에 주로 건설되어 운영되고 있다. 또한 향후 건설 예정인 대용량 풍력발전단지들도 이들 지역을 중심으로 설계되고 있다.

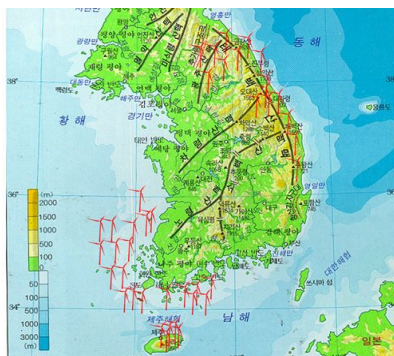


그림 1 국내지형특성과 바람자원

4. 우리나라 바람자원 예측과 비교

현재까지 국내 바람 자원은 대학이나 연구소, 민간회사가 각각 관심 있는 국부적인 지역에 대해서만 조사되어졌다.

이 논문에서는 강원지역과 서남해안 지역에서 측정한 바람자원 데이터에 기초해서 예상풍력발전량을 직접 비교하므로써, 우리나라 지형에 따른 바람자원의 특성을 분석하여

풍력발전의 타당성을 평가하였다.

4.1 조사 지역

이 논문에서는 50m 높이의 풍력계측타워를 설치하고, 1년 동안 바람자원을 계측하였다. 풍력계측타워를 설치한 지역의 특성은 다음과 같이 3개 지역으로 구분하였다.

- **Local A** : 지역 A는 서북 방면이 바다이고, 주변 10Km 이내의 고도가 200m 이하인 평탄지형으로 반경 1Km 이내 경사도가 0도인 서해안지역.
- **Local B** : 지역 B는 주변지역 10Km내외에 100m 고도의 산이 존재하는 반경 1Km 이내 경사도가 5도인 서남해안지역.
- **Local C** : 지역 C는 주변에 600m에서 1300m의 산들로 이루어진 반경 1Km 이내 경사도가 30도 이상인 산악지대.

4.2 풍속과 풍향 특성

그림 2에는 세 지역에서 측정한 월별평균 풍속과 수식 3에 평균풍속을 대입하여 얻은 월별에너지 밀도를 나타내고 있다. 7-8월을 제외하면 평균풍속과 에너지밀도는 지역 C가 가장 크고 지역 B가 가장 작다. 따라서 그림 2의 풍속 그래프에서는 지역 C의 풍력발전량이 다른 지역에 비해서 매우 클 것으로 예상된다.

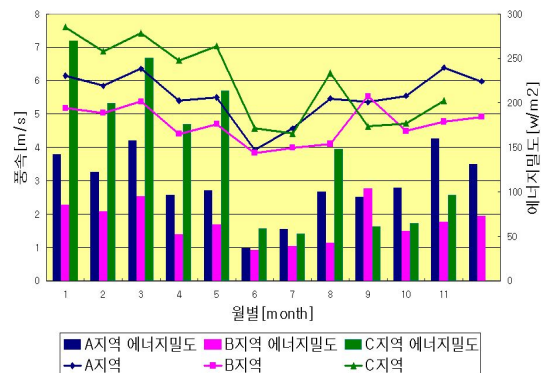


그림 2 월별풍속과 에너지 밀도

특정 지역에서 풍향은 풍속과 함께 바람자원의 특성을 파악할 수 있는 중요한 변수 중에 하나이다. 바람자원을 계측한 세 지역의 풍속빈도와 바람장미를 부록 A와 부록 B에 나타내었다. 부록 A에 나타난 풍속빈도 그래프는 각 방향에서 부는 풍속과 바람의 빈도를 나타낸 것이다. 그리고 부록 B에 나타낸 바람장미(wind rose)는 각 방위별 평균풍속을 나타낸 것이다.

부록 A에 나타난 풍속빈도에서 지역 A와 지역 B의 주풍은 북서풍과 남동풍이고 C 지역의 주풍은 남서풍임을 알 수 있다. A지역과 B지역은 풍속에 영향을 미칠만한 지형적 요소가 적으므로 우리나라 주풍이 그대로 계측되는 것으로 판단된다. 이와 반면에 C지역은 북쪽과 서쪽의 높은 고도의 산으로 둘러싸인 주변지형의 영향으로 인하여 우리나라 주풍과 다른 풍황에너지가 분포하고 있다.

또한 C 지역의 풍속의 크기가 가장 큰 값을 가지고 있다. 바람장미에서 지역 A와 지역 B의 풍향은 전 방위에서 고르게 형성된 반면 C 지역은 특정 방위에서만 풍향이 형성됨으로써 산악지형의 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다.

4.3 보정 풍속

지표면의 상태와 계측기의 높이에 따라 풍속은 변화한다. 높이 변화에 따른 보정풍속은 식 1로부터 예측할 수 있다.

그림 3은 높이 30m와 50m에서 실측한 평균풍속으로부터 보정한 높이에 따른 보정풍속 그래프이다. 보정풍속은 계측기 설치지점의 고유한 특성을 나타내고 있다. 먼저 A 지역은 해발고도 50m 이내로 반경 1Km 이내의 경사도가 0도이고, B 지역은 반경 1Km 이내의 경사도가 5도이다. 반면 C 지역은 해발고도가 약 700m로 반경 1Km이내의 경사도가 30도 이상인 지역이다.

그림 3에서 실측타워지점의 주변 경사도가 클수록 실제 측정된 풍속이 보정풍속보다 낮

다. 즉, 측정지점의 경사도가 클수록 난류와 돌풍으로 인하여 상대적으로 낮은 높이에서의 풍속이 증가)한다.^[10] 이는 실제 발전기 높이의 보정풍속의 신뢰도를 감소시키는 되기 때문에 고산지대와 같이 경사도가 높은 지역에서는 예상발전량이 실제 발전량보다 크게 산출될 가능성이 있다.

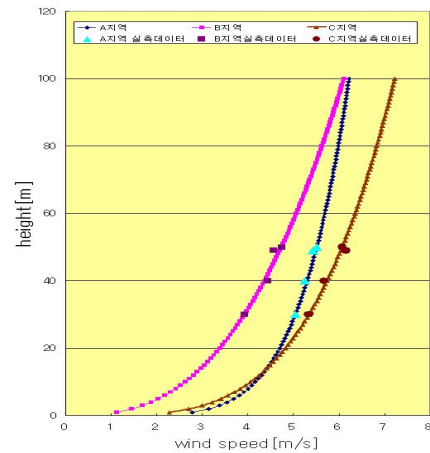


그림 3 높이에 따른 보정풍속

4.4 풍속표준편차

그림 4는 각 지역의 풍속을 3분에 한 번씩 측정 후 10분 동안의 풍속평균을 계산한 풍속데이터의 각 시간대별로 나타낸 풍속표준편차이다.

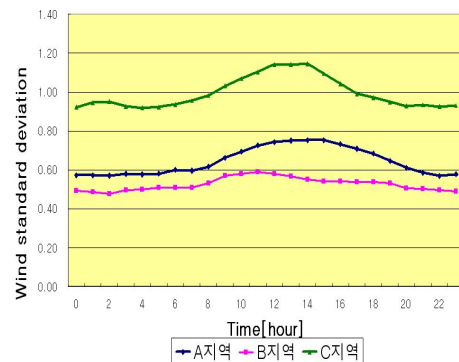


그림 4 풍속표준편차

1) WindPro2.5 가이드 북 151page의 그림을 부록 C에 나타내었다.

모든 지역에서 낮 시간에 상대적으로 풍속 표준편차가 크다. 그리고 주변 지형이 낮고 지면의 거칠기(roughness)가 낮을수록 풍속 표준편차는 작는데, 이것은 주변 지형의 고도가 평탄하고, 나무 등 풍속에 영향을 줄 수 있는 요인이 없는 지역에서 순간풍속의 변화가 작음을 의미한다. 반면에 산악지형의 특성을 나타내고 있는 지역 C에서 풍속변화가 심하므로 실제 풍속이 높아도 발전량은 크지 않을 수 있다.

4.5 풍속확률밀도

풍속확률밀도는 임의의 풍속대의 출현 빈도를 의미한다. 그림 5는 이 연구에서 조사한 세 지역의 실측된 풍속의 빈도이다. 지역 A와 B의 형상계수가 지역 C의 형상계수보다 크고 척도 계수는 비슷한 값을 가지고 있다. 따라서 지역 C의 풍속에서 4(m/s) 이하의 저속 풍속이 차지하는 비율이 지역 A나 B보다 높다. 비록 지역 C의 평균 풍속이 높아도 풍력발전기의 cut-in 풍속에 많은 부분을 차지하므로 전체발전량이 오히려 지역 A나 B보다 작거나 비슷할 수 있음을 예상할 수 있다.

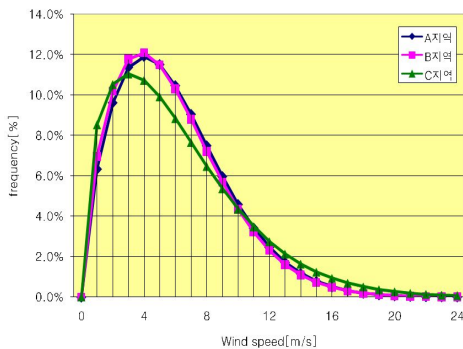


그림 5 Weibull distribution

5. 발전량 분석

풍력발전기 제작사는 발전기 용량에 따른

발전기성능곡선을 제공한다. 그림 6은 Vestas와 Enercon사의 발전기²⁾들의 풍속 대비 발전 성능곡선이다. 풍속이 약 10(m/s) 이하에서 1.8 MW와 2.0 MW 발전기 출력은 거의 동일하고 특히 5(m/s) 이하의 풍속에서는 발전량에 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

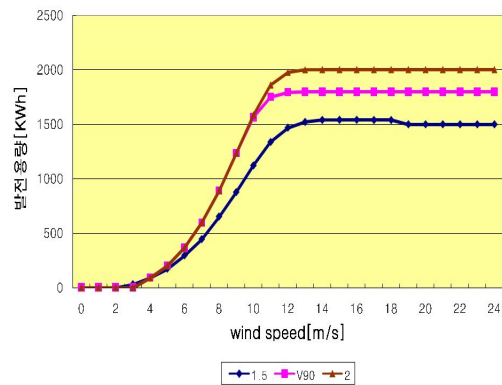


그림 6 발전기 성능 곡선

풍력발전기의 발전량은 발전기의 성능곡선과 Weibull 함수의 곱에 비례한다. 이 연구에서 발전량은 식 5를 이용하여 계산하였다.⁷⁾

$$P_w = \sum [P(V) \times f(V) \times 8,760] \quad (5)$$

그림 7은 수식 5에서 계산한 발전량을 1년 동안 누적한 연간발전량과 발전빈도를 나타낸 것이다.

발전빈도는 확률밀도함수의 형상계수와 비례하므로 지역 A, B, C 순서로 많다. 또한 연간발전량은 2MW이상 급에서는 발전빈도와 다르게 A, C, B순으로 많았다. 이것은 C가 B보다 12m/s이상의 풍속이 상대적으로 많아졌기 때문이다.

2) 1.8MW, 2.0MW의 발전기 모델을 V90이고, 1.5MW는 Enercon E-66

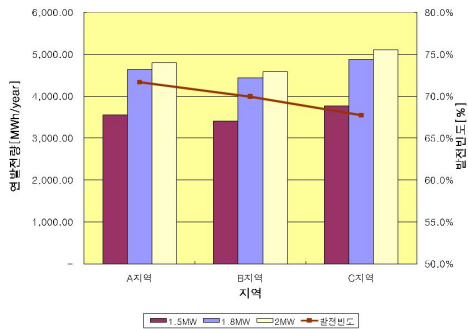


그림 7 연간발전량과 발전비율

이 논문에서는 조사 지역에 대한 실측된 풍황데이터를 이용하여 표 1과 같은 결과를 얻었다. 표 1에서 평균풍속은 지역 C가 가장 크고 형상계수는 지역 A가 가장 크다. 그리고 풍속 4(m/s) 이상의 발전비율은 지역 A, B가 지역 C보다 훨씬 크다. 따라서 지역 A, B의 평균 풍속이 지역 C보다 낮은 반면 발전시간은 많다.

표 1 발전비율과 발전시간

지역	풍속 [m/s]	K(형상계수)/C(적도계수)	발전비율 ³⁾ [%]	발전 시간	
				[hour]	[date]
A	5.51	1.73/6.61	71.7	6281.0	261.7
B	5.55	1.69/6.44	70.0	6131.5	255.5
C	6.07	1.46/6.7	67.7	5933.2	247.2

표 1의 발전시간과 그림 6의 발전기종별 성능곡선에 의하여 연간예상발전량을 계산한 결과는 표2와 같다.

표 2 예상 발전량

용량 지역	1.5MW [MWh/y]	1.8MW [MWh/y]	2MW [MWh/y]
A	3,552.32	4,636.21	4,799.86
B	3,405.27	4,439.96	4,595.46
C	3,766.33	4,877.59	5,103.78

3) 발전기 기동풍속인 4m/s이상풍속의 연중 빈도

6. 결 론

- (1) 이 논문에서는 우리나라 지형특성을 고려하여 풍력발전단지를 선정하거나 설계하는데 이용할 수 있는 방법에 대해서 기술하고 있다.
- (2) 풍력발전에서 가장 중요한 변수는 풍속이다. 그러나 우리나라와 같은 산악지형에서는 지형의 영향을 충분히 반영할 수 있는 분석이 병행되어야 근사적인 예상발전량을 산정할 수 있다.
- (3) 이 논문에서는 풍속뿐만 아니라 풍속확률밀도와 평균표준편차를 도입하여 산악지형과 평야지역의 바람자원을 분석하였다. 연평균풍속이 높은 산악지역인 C지역을 기준으로 평지인 A지역의 발전량은 94%이상으로 예상되었다.
- (4) 풍속이 높은 산악지역에서 예상된 풍력발전단지의 발전량 평지지역에서 예상된 풍력발전단지의 발전량이 연평균풍속에 비교하여 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다. 이는 산악지역의 특성상 풍속확률밀도의 형상계수가 낮고, 산풍의 영향으로 풍속표준편차가 크기 때문에 연평균풍속이 높아도 실제 발전량은 작게 출력되는 것으로 생각된다.
- (5) 향후 국가적으로 불필요한 자원 낭비를 방지하기 위해 다른 산악지역과 평지에서 측정한 많은 데이터에서 보다 더 정확한 우리나라 지형특성이 풍력발전에 끼치는 영향을 연구할 필요성이 있다.

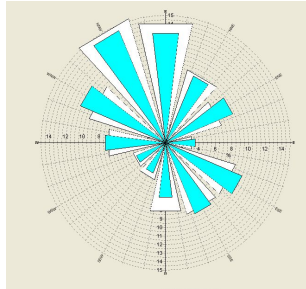
참 고 문 헌

1. 한국에너지기술연구원, 풍력발전단지 건설 타당성 조사연구, 2007.11.
2. 목포대학교 신재생에너지기술연구센터, 전남지역 육해상 풍력자원 조사 및 건설 타당성 분석 2008. 04

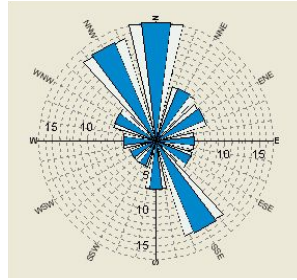
3. 목포대학교 신재생에너지기술연구센터, 서남해안의 대규모 풍력단지 설계, 2008. 07
4. 한국에너지기술연구원, 풍력발전단지 건설 타당성 조사, 2006. 07
5. 한국에너지기술연구원, 진도군 풍력발전단지 건설 타당성 조사 연구, 2004.09
6. 변효인, 류지윤, 김두훈, 풍력자원해석 및 에너지예측을 통한 풍력발전단지 설계 연구, 신재생에너지 학회지, Vol. 1, No. 2, 2005.
7. 고경남 외, 풍력공학입문, 문운당, 2006.
8. 박광현 외, 덴마크·독일 모델의 풍력발전 기술, 겸지사, 2007.
9. EMD, WindPro 2.5 User Guide ,edition, Jan.2006.
10. E. A. DeMeo, W. Grant, M. R. Milligan, M. J. Schuerger, Wind plant integration, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 3, No. 6, pp. 38-46, 2005.
11. E. A. DeMeo, G. A. Jordan, C. Kalich, J. King, M. R. Milligan, C. Murley, B. Oakleaf, M.J. Schuerger, Accommodating Wind's Natural Behavior, IEEE Power and Energy Magazine, Vol 5, No. 6, pp. 59-67, 2007.
12. B. Ernst, B. Oakleaf, M. L. Ahlstrom, M. Lange, C. Moehrlen, B. Lange, U. Focken, K. Rohrig, Predicting the Wind, IEEE Power and Energy Magazine, Vol 5, No. 6, pp. 78-89, 2007.

APPENDIX

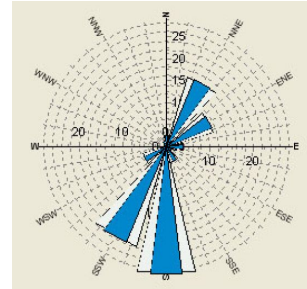
부록 A 조사지역의 풍향빈도



(a) A지역

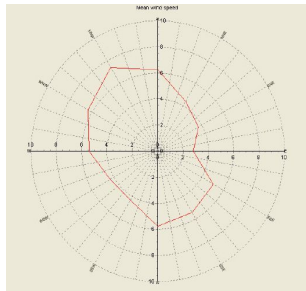


(b) B지역

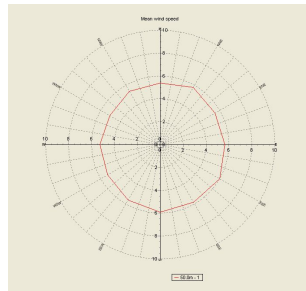


(c) C지역

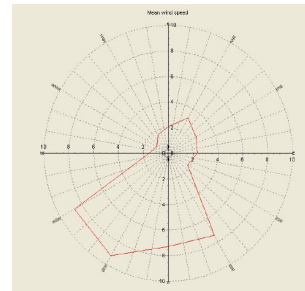
부록 B 조사지역의 바람장미



(a) A지역



(b) B지역



(c) C지역

부록 C 경사도에 따른 높이별 바람자원

