

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
 Journal of the Korean Solar Energy Society
 Vol. 23, No. 1, 2003

복잡지형에서의 WAsP 예측성 평가

An Assessment of WAsP Prediction in a Complex Terrain

경남호*, 윤정은**, 허종철***, 장동순**
 N.H. Kyong*, J.E. Yoon**, J.C. Huh***, D.S. Jang**

Key words : 풍력 자원(wind resource), 복잡지형(complex terrain), 표면 거칠기(surface roughness), 장애물(obstacle), 와이불 분포(weibull distribution)

Abstract

In order to test the predictability of the wind resource assessment computer code in our country, a field experiment and prediction by WAsP has been compared. A field experiment has been performed in Songdang province, Jeju island, composed of sea, inland flat terrain, a high and a low slope craters. For this experiment, four meteorological towers have been installed at seashores, inland flat and on a crater. Wind resource at one site is predicted by WAsP with the meteorological data at the other three sites. The comparisons show that the WAsP predictions give better agreement with experimental data by adjusting the roughness descriptions.

■ 기호설명 ■

L : 언덕 상반부의 높이가 H/2인 지점으로부터 언덕 정상까지의 수평거리[m]	지는 풍속 [m/s]
A : Weibull 분포의 상수, 가장 높은 빈도를 가	K : Weibull 분포의 Shape factor [-]
	p : 풍력밀도 [W/m ²]
	D : 단면적 [m ²]

* 한국에너지기술연구원
 ** 충남대학교 환경공학과
 *** 제주대학교 기계공학과

* Korea Institute of Energy Reserch
 ** Chungnam University, Dept. of Environmental Engineering
 *** Cheju University, Dept. of Mechanical Engineering

1. 서론

풍력 발전 시스템은 현재까지 가장 경제성이 있는 대체 에너지원이지만 설치 장소 선정이나 풍황의 평가가 부정확하게 되면 수명이나 투자회수 기간의 평가에 결정적인 오류가 발생할 수 있다. 평지 지형에서의 풍황 평가는 한 지점의 대표적인 기상탑만으로 풍황 평가가 가능하지만 산지 지형에서는 지형에 따라 풍황이 심하게 변화하므로 여러 개의 기상탑을 설치하여도 전체적인 국지 풍황 평가가 쉽지 않다. 특히 우리 나라는 국토의 70%가 산지이므로 향후 풍력 발전 시스템의 보급을 위해서는 풍황의 보다 정확한 평가가 필요하며 이를 위해서는 고가의 기상탑을 설치하여 측정하기 보다는 풍황 예측 코드를 활용하는 것이 바람직하다.

시험장소는 바다와 평지 및 산지가 있는 제주도 송당 지역에서 현장 실측을 수행하였으며 풍황 예측 코드로서 가장 널리 사용되고 있는 덴마크 Risoe 연구소의 WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)을 이용하여 측정 지점간의 상호 예측치와 실측치를 비교하여 국내에서의 WAsP 적용 가능성을 평가하였다.

본 연구의 대상인 WAsP은 복잡지형을 지나는 유동장 해석을 위하여 개발된 유한 체적 모델을 이용하였으며, 사용된 유동 이론은 Jackson과 Hunt^[1]의 선형이론이다. 이 이론에서는 $H/L \ll 1$ 인 완만한 언덕을 지나는 대기유동을 외부층(outer layer)과 내부층(inner layer)으로 나누어 해석을 하였다. 외부층은 언덕의 존재에 의한 압력섭동(pressure perturbation)으로 유속섭동(velocity perturbation)이 발생하는 비점성 포텐셜 유동영역으로 가정되며, 내부층은 지표면 근처의 두께가 l 인 얇은 층으로써 평균유동이 전단응력의 변화에 크게 영향을 받는 영역이다. Mason과 King^[2]은 Jackson과 Hunt의 2차원 이론해석을 3차원으로 확장하였으며 내부층과

외부층의 경계면에서 유속의 연속조건을 부과하였다.

비압축성 유동영역인 외부층에서의 선형화 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\Delta u_o)}{\partial(x/L_1)} = -\frac{\partial(\Delta p_o)}{\partial(x/L_1)} \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\Delta w_o)}{\partial(x/L_1)} = -\frac{\partial(\Delta p_o)}{\partial(z/L_1)} \tag{2}$$

$$\nabla^2(\Delta p_o) = 0 \tag{3}$$

내부층에서는

$$\frac{\partial(\Delta u_i)}{\partial(x/L_1)} + \frac{\partial(\Delta p_o(z=0))}{\partial(x/L_1)} - \frac{\partial}{\partial(x/L_1)} \left\{ \frac{z}{l} \frac{\partial(\Delta u_i)}{\partial(z/l)} \right\} = 0 \tag{4}$$

$(\Delta u, \Delta w)$ 는 방향 유속섭동, ΔP 는 동압 섭동이며 아래첨자 o 와 i 는 각각 외부층과 내부층을 의미한다.

위의 포텐셜 방정식은 Fourier변환을 이용하여 해를 구할 수 있는데,

$$F\{\Delta p_o\} = -|\bar{k}| F\{f(x, y)\} \exp\left(-\bar{k} \frac{z}{L_1}\right) \tag{5}$$

$$F\{\Delta u_i\} = |\bar{k}| F\{f(x, y)\} \left\{ 1 - \frac{K_o(2\sqrt{ikz/l})}{K_o(2\sqrt{ikz_o/l})} \right\} \tag{6}$$

$F\{ \}$ 는 Fourier변환을 의미하며 $f(x, y)$ 는 지표고도를 나타내는 형상함수, K_o 는 0차 Modified Bessel 함수이다.

2. WAsP Program

자연 상태에서는 지형에 따라 급격한 변화를 보이는 연속적인 대기 유동의 예측은 현재의 수퍼

컴퓨터로는 아직 역부족이며 예측을 하다고 하여도 낮은 신뢰성과 높은 해상도로 직접적으로 활용하기가 곤란하다. 따라서 특정 높이, 특정 지표 거칠기에서의 풍속 분포 함수를 예측하는 Wind Atlas Method를 사용한다. 이는 자연 상태의 풍속 분포가 두 상수, Scale parameter A와 shape factor k로 묘사되는 Weibull 분포 함수에 근접한다는 가정을 바탕으로 이루어지며, 이는 풍속이 매우 낮은 지역을 제외한 대부분의 지역에서 만족된다.

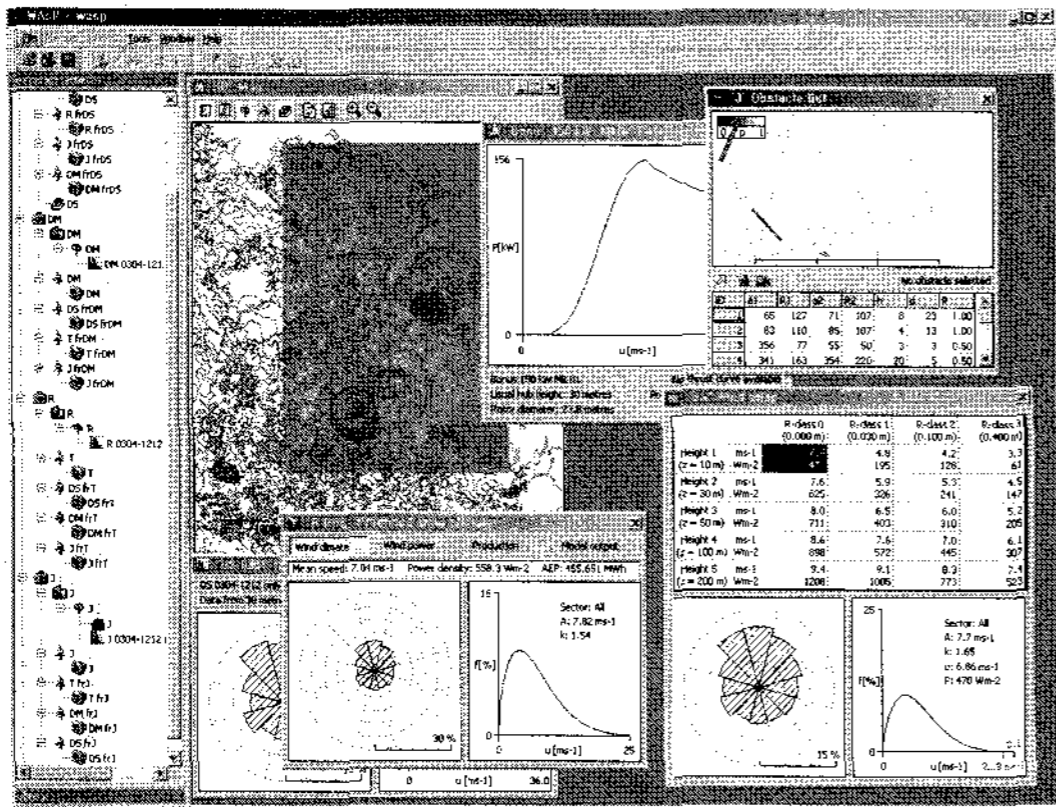


그림 1. the Interface of WAsP

이러한 Wind Atlas Method를 통해 예측을 수행하기 위해서는 지표 거칠기 변화와 지형의 높이 변화를 고려하는 모델이 필수적이다. 지표거칠기 변화의 영향을 계산하기 위한 the roughness change model, 언덕에 의한 speed effect를 계산하기 위한 hill model, 장애물들에 의한 영향을 계산하는 shelter model들이 사용된다.^[4]

WAsP을 통한 정확한 예측을 위해서는 적용 지역이 같은 기후지역, 안정적인 주풍향, 충분히 완만하고 유동박리가 일어나지 않는 조건을 만족해야한다.^{[3][4]} 이 논문에서 현장실험을 수행한 제주도 송당 지역은 북서의 안정적인 주풍향과 완만한 분화구로 이루어진 지형을 가짐으로 위의 조건을 만족한다.

3. 현장 실험

3-1. 기상 측정 마스트

가장 정확한 예측을 위해서는 설치예상 풍력발전 시스템의 허브높이에서 풍속을 측정해야 하나, 30m 이상의 구조물에 대한 안정성문제와 제작상의 예산문제를 고려하여 측정높이가 30m인 측정 pole을 고정적으로 설치 운영하였다.

계측장비는 신호선을 통해 지상에서 미국 NRG사의 #9300 Wind Data Logger를 통해 지속적으로 풍속 및 풍향자료를 수집하게 되며, 일정기간 후 Data logger가 자료를 저장한 메모리 카드를 회수하여 컴퓨터를 통해 자료를 읽고 분석하는 과정을 거치게 된다.

풍속계는 Maximum #40 Anemometer를 사용하였으며, 0.78m/s에서 가동, 거리상수는 3.0m이고, 보정상수는 0.764m/sec/Hz로서 선형적으로 신호가 변한다. 풍향계는 가변저항식의 200P Wind Direction Vane을 이용하였으며, 선형도는 최대 1.0%(일상0.5%), 반응도는 1m/sec로서 작은 풍속에서도 작동하게 된다.

표 1. Specification of measuring points

Model	측정 위치		H (m)	비고
	북위(N)	동경(E)		
두산봉	33°28' 57"	126°53' 04"	112	산지
두문포	33°29' 37"	126°54' 33"	6	산지인접해안
토끼섬	33°31' 16"	126°53' 58"	3	평지해안
종달리	33°30' 21"	126°52' 41"	35	내륙평지

온도센서는 100S Temperature Sensor로서 정확도는 최대 ±1.11℃, 비선형도는 최대±0.33℃, 열적 시정수는 5분, 전기적 시정수는 250μs이다. 재질은 알루미늄이다. 대기압의 측정을 위한 BP-20 Pressure Sensor도 부착하였으며, 이 센서의 보정상수는 0.046V/kPa이며, 최대

0.1%의 비선형도를 지니고 있다.

이밖에도, 일사량계는 LI-200SA Li-Cor Pyranometer를 사용하였으며, 일사량에 비례하여 미소전류가 흐르는 High-stability silicon photovoltaic 형으로서 안정도는 12개월 간 2% 미만으로서 안정적인 상태를 유지한다.

3-2. 측정 지점

WAsP의 예측 정확성을 우리나라의 지형에 적용하여 평가하기 위해서는 WAsP에서 사용하고 있는 선형이론의 적용가능 범위내의 특성을 가지고 있는 지형을 선택하는 것이 매우 중요하다.

제주도 송당지역은 표.1과 그림.2에 나타난 것과 같이 각각 특성이 다른 네 가지 지형을 두루 갖춘 지역이기 때문에 이번 연구에 가장 적합한 지역이라 판단된다. 전체 계산 대상 영역은 9.25km × 7.5km, 지점간 거리가 최장 4.5km이다.

두산봉은 완만한 평지에 위치한 종달리의 남쪽 2km 지점에 해발 145.9m의 두산봉의 경사면에 위치해 있다. 언덕의 형태를 나타내는 기하학적 변수 $s = H/2L_1$ 이다. 선행된 수치해석적 연구^[6]에 의하면 $s < 0.3$ 인 언덕에서는 유동박리가 발생하지 않는데, 두산봉은 $s=0.17$ ($=145.9m / (2 \times 426.22m)$)로 WAsP의 유동박리가 발생하지 않아야하는 조건을 만족한다.

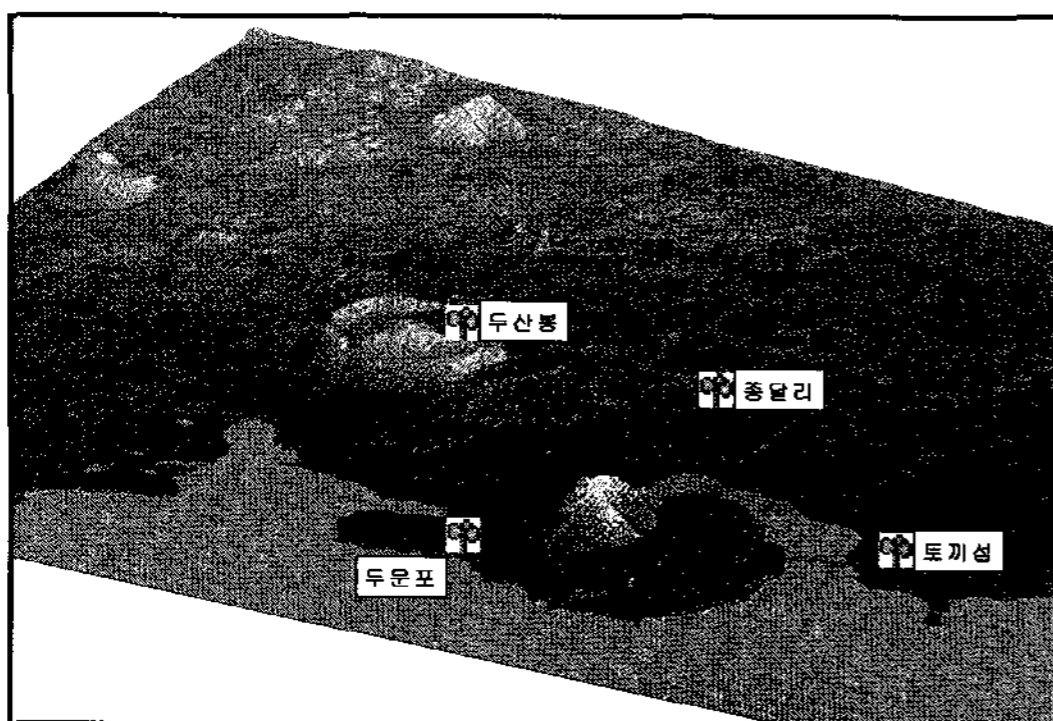


그림 1. WireMap of SongDang

두문포는 해발 165m인 지미봉의 남동방향 500m 아래에 위치한 평지에 위치해 있다. 해안가와 맞닿아 있으면서도 분화구와 접해 있어 장애물에 의한 풍황변화 예측에 적합하다.

토끼섬은 제주도 동쪽 끝 하도리 해안가에 위치한다. 해안과 맞닿은 완만한 평지, 적은 장애물로 해안을 대표하는 지점이다.

종달리는 하도리 해안가로부터 약 3km 떨어진 평지 내륙 지역에 위치하고 있어 지표거칠기의 영향을 평가하는데 적합하다.

3-3. 데이터 분석

측정 기간은 2002년 2월 26일부터 2002년 5월 31일이며, 측정높이는 지면으로부터 30m, 약 3개월 간의 10분 평균 데이터로 데이터 개수는 총 106,436개, 회수율은 95.8%이다. 측정 항목은 10m, 20m, 30m에서의 풍속과 풍향, 습도, 일사량, 압력, 온도이다.

표 2는 현장 실험 결과로서 각 측정지점의 평균 풍속과 풍력밀도, 오차율을 나타내었다. 오차율은 평균속도, 풍력밀도의 실측치와 데이터를 Weibull 분포에 적용 시 얻어지는 그 값의 차를 나타내는 값으로, 데이터 수집 상태의 양호 여부를 나타내는 지표이다.^[9] 그 값이 3% 내 일 때 양호한 것으로 규정되어있으므로 3.48%의 값을 가지는 두문포의 풍속을 제외한 네 지점에서의 데이터 수집 상태는 매우 양호한 것으로 판단된다. 두문포의 평균풍속에 대한 오차율은 보다 장기간의 데이터가 얻음으로 개선될 것으로 기대된다.

두산봉은 평균속도 6.17m/s, 최대속도 21.2m/s, A 7.1m/s, 풍력밀도 288.39W/m²로 네 지점 중 가장 높은 풍황 에너지를 가진다.

두문포는 같은 해안지역인 토끼섬보다 낮은 풍황 에너지를 가진다. 이는 같은 해안이지만 주풍향 북동방향에 위치한 지미봉과 내륙의 지표 거칠기의 영향을 보여준다.

토끼섬은 평균풍속이 5.99m/s로 두 번째로 큰

풍향 에너지를 가진다. 해안에 위치하여 지표 거칠기와 장애물 등에 의한 풍속 감소가 상대적으로 적기 때문에 사료된다.

종달리는 평균풍속 4.78m/s, 풍력밀도 152.35W/m²로 가장 낮은 풍향 에너지를 가진다. K는 그 값이 클수록 높은 속도 구간에서 높은 풍속 빈도를 가지며, 풍속의 정규분포는 넓게 분포하는 것을 의미한다.^[9] 종달리가 1.76으로 가장 작은 값을 가져 그 분포가 가장 밀집된 형태를 가진다. 이 두 가지 특성 모두 표면 거칠기에 의한 풍속감소에 의한 것으로 사료된다.

그림 3부터 그림 6은 네 지점의 풍향 빈도를 나타내는 바람장미이다. Discretisation Bin Width는 측정 Bin과 동일한 1°로 설정했다.

그림 5의 토끼섬은 풍향 빈도가 북서로 편중되어 나타나는데 편향이 거의 발생하지 않는 지형에 의해 송당 지역의 주풍향이 그대로 나타나는 것을 의미한다. 그림 4의 두문포 역시 북서의 풍향 빈도가 높으나 315°에서 빈도의 뚜렷한 감소를 확인할 수 있다. 이는 두문포의 315°에 위치한 지미봉에 의한 편향의 결과라 판단된다.

이렇게 토끼섬과 두문포는 주풍향이 뚜렷이 나타나는 반면, 두산봉과 종달리는 언덕과 평야, 표면 거칠기 등 지형지세에 의한 편향으로 변형된 것을 알 수 있다. 그리고, 두산봉은 편향이 발생하였다 하더라도 북서의 주풍향이 확인 가능하지만, 종달리는 그렇지 않은데 이는 종달리의 지속적인 지형지물들에 의한 편향의 영향이 크기 때문으로 사료된다.

그림 7은 네 지점의 Probability를, 그림 8은 Probability로부터 얻은 Weibull 분포이며 표 3은 풍속구간별 발생 빈도이다.

두산봉의 Probability는 Peak가 두 번 나타나는 독특한 모양을 하고 있다. 또한 내륙에 위치해 있으면서도, 해안지점인 토끼섬과 두문포 보다도 1m/s 미만의 풍속 빈도가 3.98%로 가장 낮은 수치를 가지며, 높은 풍속에서 해안에 위치한 두

문포, 토끼섬과 비슷하게 높은 빈도를 가진다. 10m/s 이상은 풍속 빈도가 11.93%이다. 이는 내륙에 위치한 종달리의 같은 구간에서의 빈도가 7.12%인 것과 비교해 볼 때 산지에서의 Speed-up effect가 뚜렷이 나타난 결과라 할 수 있겠다.

두문포의 경우, 10m/s이상 풍속 빈도가 10.79%로 같은 해안에 위치한 토끼섬의 같은 구간의 빈도 13.95%에 비해 현저히 낮은 값을 가진다. 또한 1m/s 미만 빈도는 7.01%로 가장 높게 나타난다. 이와 같은 특성은 지미봉에 의한 풍속 감소 때문으로 사료된다.

표 2. Wind Characteristics of points

측정지점		측정값	Weibull-fit	오차율 (%)
두산봉	MS	6.17	6.27	1.61
	PD	288.39	289.39	0.22
두문포	MS	5.66	5.85	3.48
	PD	231.66	232.23	0.24
토끼섬	MS	5.99	6.08	1.50
	PD	278.00	278.55	0.20
종달리	MS	4.78	4.84	1.22
	PD	152.35	152.8	0.29

측정지점	Calm No.	최대속도 (m/s)	A (m/s)	K	바람장미 & Weibull 분포
두산봉	258 (1.96%)	21.2	7.1	2.0	
두문포	582 (4.27%)	20.2	6.6	2.02	
토끼섬	510 (3.88%)	19.8	6.9	1.89	
종달리	475 (3.71%)	17.8	5.4	1.76	

- MS: 평균풍속 [m/s], PD: 풍력밀도 [W/m²]
- Weibull-fit : Weibull 분포에서의 값
- 오차율 : 측정값과 Weibull 분포 상의 값의 오차
- Calm No. : 0m/s의 갯수와 비율

토끼섬은 네 지점 중 10m/s이상의 풍속 구간에서 13.95%로 가장 높은 빈도를 가지며, 1m/s

미만에서 빈도 5.72%로 두산봉에 이어 두 번째 작은 값을 가진다. 이는 해안이면서 비교적 장애물에 의한 교란이 적은 지점이기 때문으로 판단된다.

종달리는 5m/s이하의 풍속이 전체의 52.97%, 10m/s 이상 7.12%, 1m/s미만 6.41%로 네 지점 중 가장 낮은 풍속을 가지는 것으로 나타났다. 이는 내륙에 위치하여, 지표 거칠기에 의한 지속적인 풍속감소에 의한 것으로 판단된다.

지금까지의 데이터 분석과정을 통하여, 네 지점의 실측 데이터는 각 지점의 특성을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

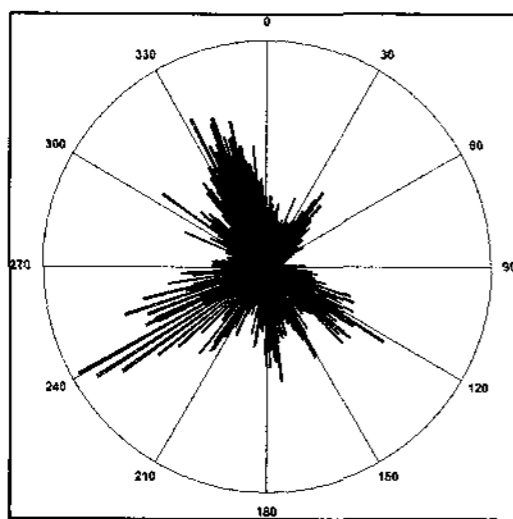


그림 3. DuSanBong

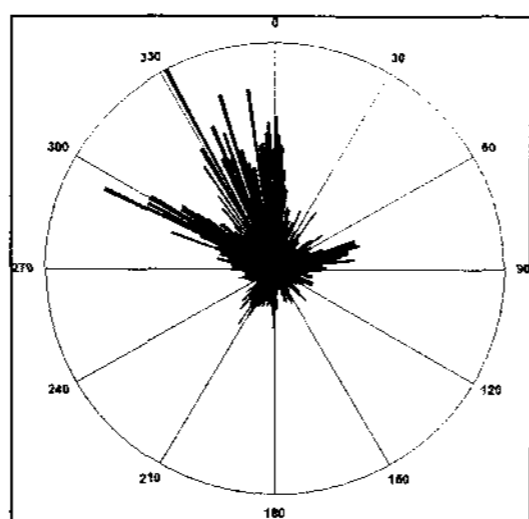


그림 4. DuMunPo

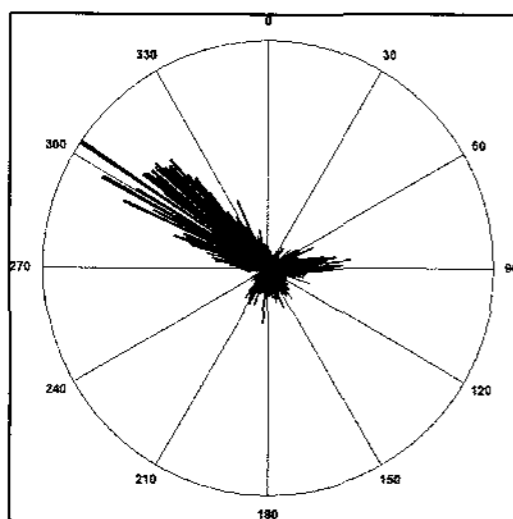


그림 5. Tokki

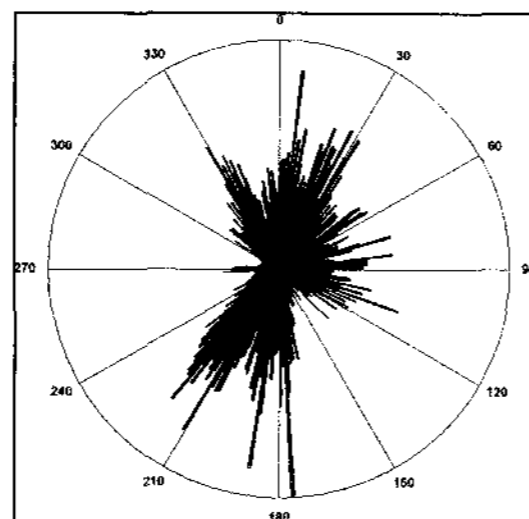


그림 6. JongDali

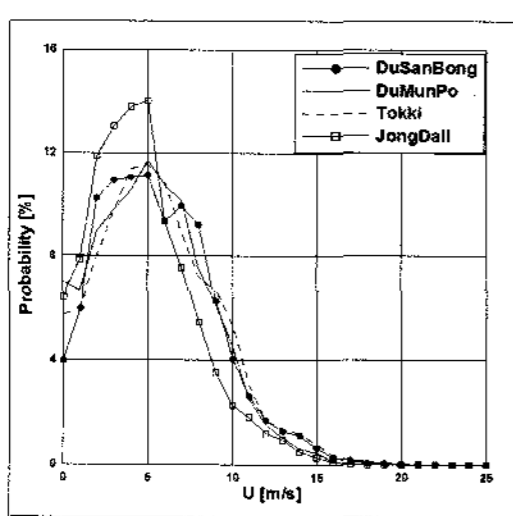


그림 7. Probability

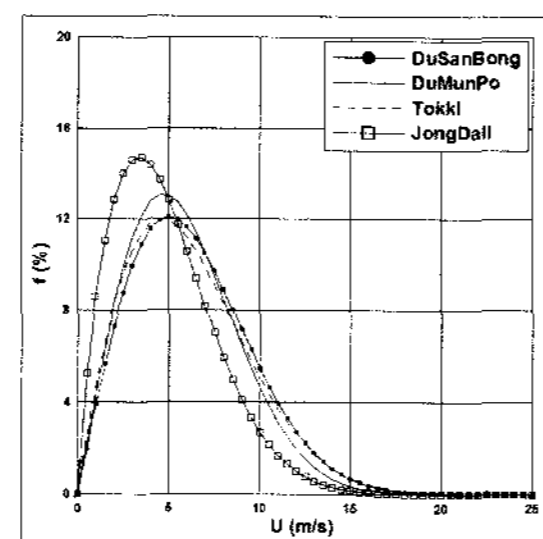


그림 8. Histogram of the Weibull parameters

표 3. Probability (%)

	< 1m/s	< 3m/s	< 5m/s	> 10m/s
두산봉	3.98	20.19	42.18	11.93
두문포	7.01	22.63	42.97	10.79
토끼섬	5.72	19.72	40.87	13.95
종달리	6.41	26.10	52.97	7.12

4. WAsP에 의한 예측 수행

한 지점의 측정 데이터를 이용하여 WAsP 코드로 원하는 지점의 예측을 수행하기 위해서는 풍황 데이터와 함께 다음과 같은 종류의 데이터가 함께 제공되어야 한다.

- 1) 유동에 영향을 주는 계산 영역의 지형
- 2) 건물과 식생에 의해 결정되는 표면 거칠기
- 3) Wake effect를 발생시키는 장애물

이들 데이터는 WAsP에서 각각 지도 파일과 거칠기 지도/장미(roughness rose), 장애물 목록의 형태로 입력된다.

그림 9는 WAsP에 입력되는 제주도 송당 지역의 2.5m 간격의 등고선 지도이며, 그림 10은 지표 거칠기 지도로 해안선을 따라 육지를 1.5m, 바다를 0.0m로 설정하였다.

5. 결과 및 고찰

한 지점에서 다른 지점을 예측하기에 앞서, 전 영역의 기후의 척도가 되는 Wind Atlas를 구하게 되는데, 표 4는 그 중 $z_0=0.0m$, $h=10m$ 일 때의 Wind Atlas를 나타낸 것이다. 정확한 예측일수록 네 지점에서 계산된 Wind Atlas의 값은 같아야 한다. 그러나, 표 4에서 두산봉의 풍황 에너지가 가장 높은 것으로 나타난다. 따라서, 지표 거칠기와 장애물 등과 관련하여 보다 정확한 데이터가 요구됨을 알 수 있다.

표 5는 자기 예측 결과이며, 자기 예측의 정확

도는 각 지점에 제공된 정보를 판단하는 척도가 된다. A와 평균풍속, 풍력밀도 모두 전반적으로 예측치가 측정치보다 작아 풍황 에너지가 과소평가 되었으나, 풍력밀도는 -20% 이상의 과소예측을 가지는 세 지점과 달리, 두산봉은 오차율 0.45%로 매우 작은 오차를 가진다.

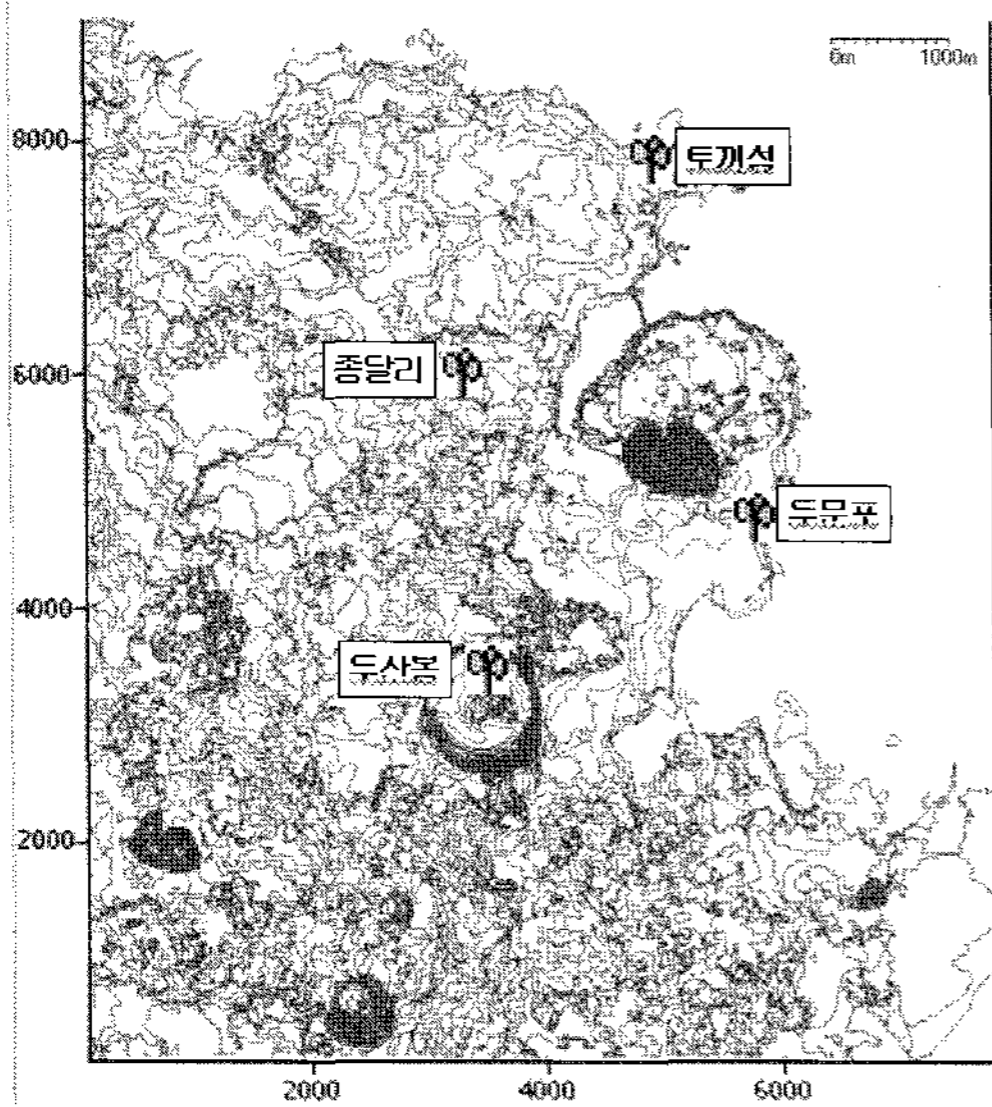


그림 9. Contour map of SongDang

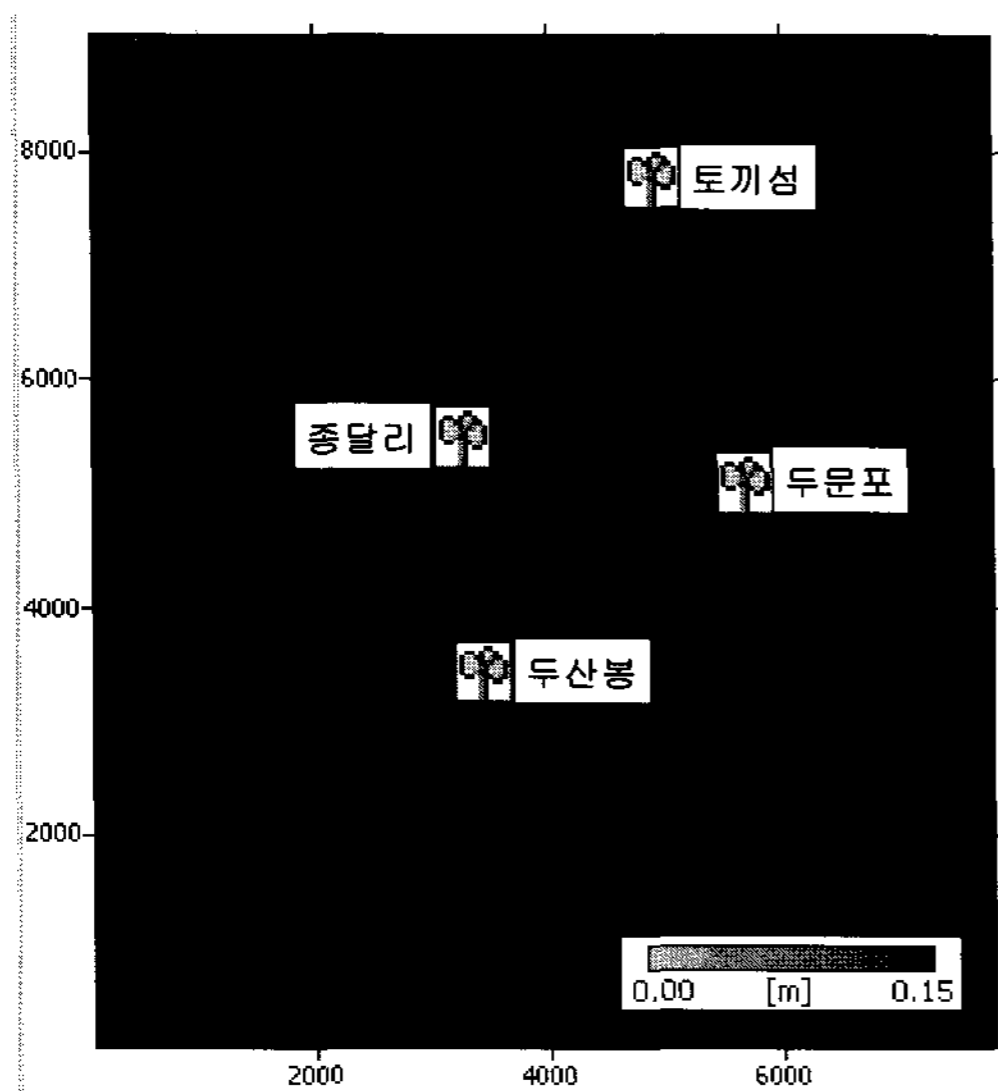


그림 10. Surface Roughness Map of SongDang

표 4. The Wind Atlas (at z0=0m, h=10m)

Model	A [m/s]	K (-)	평균 속도 [m/s]	풍력 밀도 [W/m ²]	바람장미 & Weibull 분포
두산봉	7.1	1.88	6.29	311	
두문포	6.3	1.78	5.59	232	
토끼섬	6.0	1.74	5.33	207	
종달리	5.5	1.59	4.90	180	

표 5. Comparison of measurements and WAsP Self-Prediction

	A [m/s]	K (-)	평균 풍속 [m/s]	오차율 [%]	풍력 밀도 [W/m ²]	오차율 [%]
두산봉	7.10	2.00	6.17		288.39	
DS	6.79	1.79	6.04	-2.10	289.70	0.45
두문포	6.60	2.02	5.66		231.66	
DM	5.74	1.88	5.10	-9.89	165.10	-28.73
토끼섬	6.90	1.89	5.99		278.00	
T	6.04	1.80	5.37	-10.35	202.80	-27.05
종달리	5.40	1.76	4.78		152.35	
J	4.50	1.62	4.03	-15.69	97.60	-35.93

- (+) 과대평가, (-) 과소평가
- 각 지점의 머리글자 : 그 지점으로 부터의 예측치를 의미한다.

그림 11부터 그림 14까지는 자기예측의 결과를 Weibull 분포로 나타낸 것이다. 네 지점 분포가 모두 최대치의 오른쪽의 높은 풍속구간에서는 측정치 보다 낮은 빈도를, 최대치의 왼쪽의 낮은 풍속구간에서는 높은 빈도를 예측하여 풍력 밀도가 낮게 나타났다. 그림 11의 두산봉은 상대적으로 높은 풍속 구간의 빈도가 높아 평균 풍속 예측은 과소평가 되었어도, 높은 풍속이 지배적인 풍력밀도의 특성으로 풍력밀도의 예측은 측정치에 비해 상대적으로 작은 오차를 가지는 것으로 사료된다 ($p = \rho Du^3$). 자기 예측에 의한 풍력밀도가 측정치보다 낮은 것은 측정지점 주위 지표 거칠기, 장

애물 등에 의한 풍속감소의 예측의 부정확성에 기인하는 것이므로, 이 변수들의 상향조정이 필요하다. 이는 다음을 의미한다.

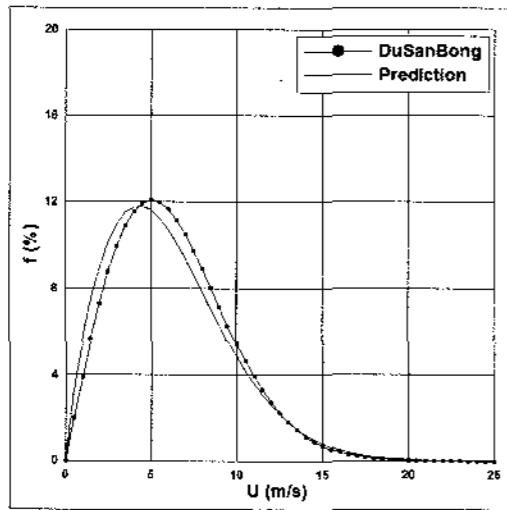


그림 11. DuSanBong

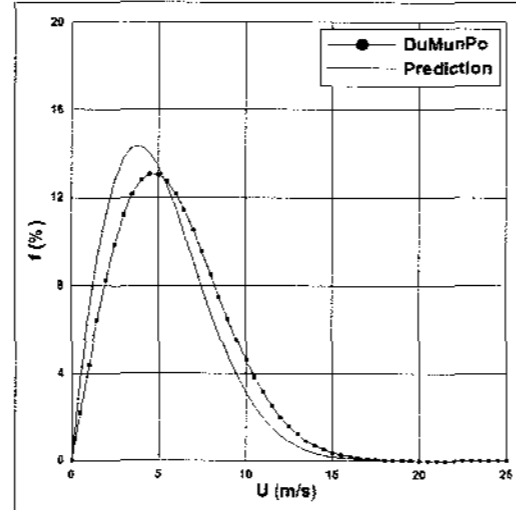


그림 12. DuMunPo

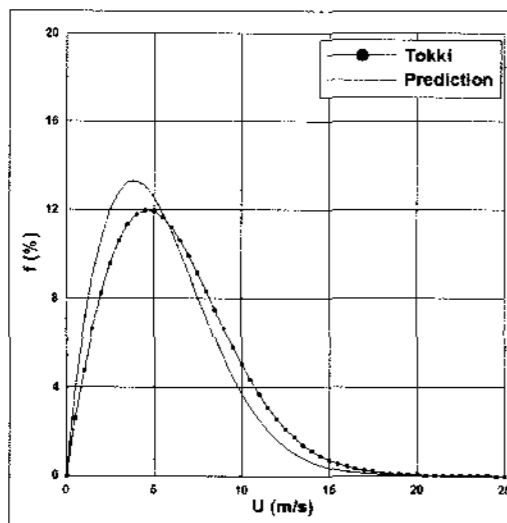


그림 13. Tokki

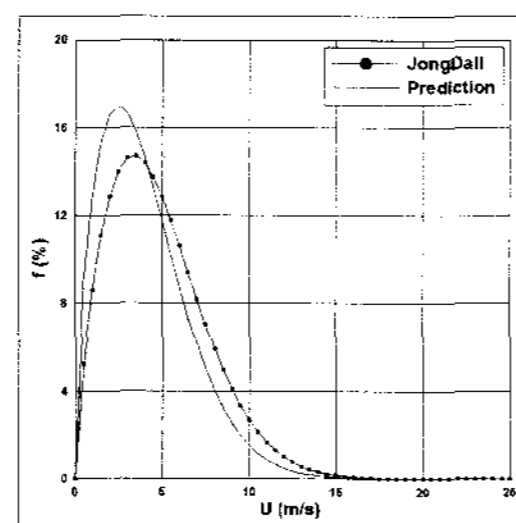


그림 14. JongDali

표 6. Comparison of Measurements and WAsP mutual-Prediction

	A [m/s]	K	평균 풍속 [m/s]	오차율 [%]	풍력 밀도 [W/m²]	오차율 [%]
두산봉	7.10	2.00	6.17		288.39	
DM	6.07	1.75	5.41	-12.32	213.80	-25.86
T	5.77	1.69	5.15	-0.17	193.00	-33.80
J	5.30	1.53	4.78	-22.53	176.50	-38.80
두문포	6.60	2.02	5.66		231.66	
DS	6.51	1.86	5.78	2.12	244.70	5.63
T	5.39	1.74	4.80	-0.15	151.30	-34.69
J	5.06	1.63	4.53	-19.96	137.90	-40.47
토끼섬	6.90	1.89	5.99		278.00	
DS	7.15	1.76	6.37	6.34	348.10	25.22
DM	6.45	1.98	5.71	-0.05	220.10	-20.83
J	5.34	1.69	4.77	-20.37	153.60	-44.75
종달리	5.40	1.76	4.78		152.35	
DS	6.02	1.80	5.36	12.13	201.00	31.93
DM	5.36	1.89	4.76	0.00	133.50	-12.37
T	5.03	1.73	4.49	-6.07	123.90	-18.67

- (+) 과대평가, (-) 과소평가
- 각 지점의 머리글자 : 그 지점으로 부터의 예측치를 의미한다.

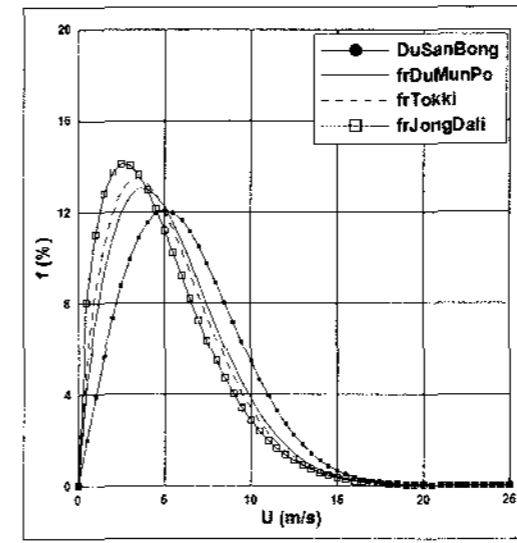


그림 15. DuSanBong

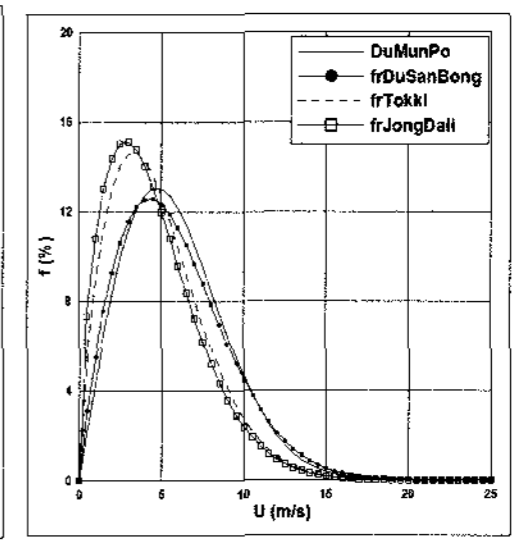


그림 16. DuMunPo

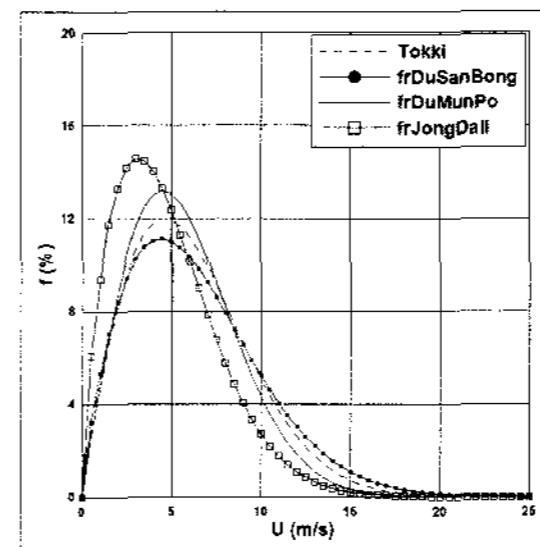


그림 17. Tokki

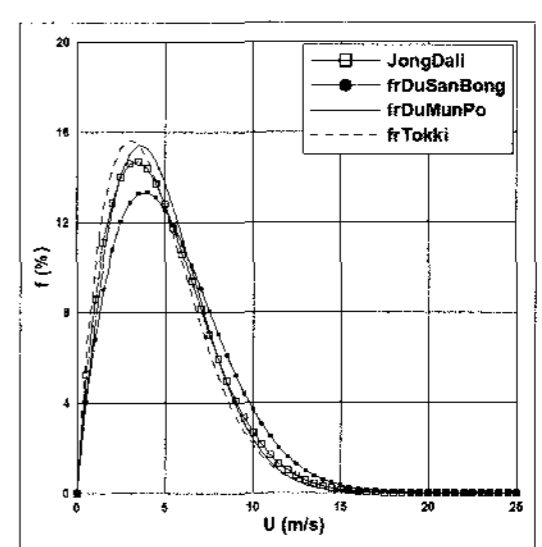


그림 18. JongDali

표 6은 상호예측의 결과이다. 종달리에서 토끼섬을 예측한 경우 오차율 -44.75%로 예측 정확도가 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 그러나, 각 지점의 특성은 예측이 가능한 것을 알 수 있는데, 두산봉으로부터 예측한 네지점의 평균 풍속은 두문포 5.78m/s, 토끼섬 6.37m/s, 종달리 5.36m/s의 예측치를 가지며, 종달리로부터의 예측 평균 풍속은 두산봉 4.78m/s, 두문포 4.53m/s, 토끼섬 4.77m/s의 예측치를 가진다. 이러한 결과는 언덕에 위치하여 풍황 에너지가 높은 두산봉의 특성과 내륙 평지에 위치하여 풍황 에너지가 낮은 종달리의 특성 등이 예측 가능성을 보여준다.

그림 15부터 그림 18까지 상호 예측 결과를 Weibull 분포로 나타낸 것이다. 두산봉 예측은 A값이 현저히 낮아 그래프가 모두 왼쪽으로 치우쳐 과소평가된 것을 확인할 수 있다. 두문포와 토끼섬 예측은 두산봉으로부터의 예측이 비교적 적은 오차를 가지며, 종달리 예측은 두문포와 토끼섬으로부터의 예측이 근접하게 나타났다.

6. 결과 및 토의

제주도 송당지역의 네 지점으로부터 측정된 3개월의 데이터로 WAsP을 통해 상호 예측을 수행해 보았으며 본 논문에서의 지표 거칠기는 해안선을 따라 일정하게 설정하였다.

네 지점의 평균 예측 오차율은 자기예측에서 풍속 -9.51%, 풍력밀도 -22.81%, 상호예측에서 풍속 -5.08%, 풍력밀도 -17.23%의 오차를 가지는 것으로 나타났다.

대부분의 예측이 과소평가 되었으며, 이는 표면 거칠기가 너무 낮거나 장애물이 고려되지 않은 결과라 판단된다.

보다 정확한 예측을 위해서는 현장 탐사 등 적용 대상 영역의 조사를 통한 데이터를 기반으로 한 지표 거칠기 수치 적용, Wake를 유발하는 장애물의 고려가 필수적임을 알 수 있었다. 또한 이러한 적용 변수들에 의한 예측능력의 변화는 보다 세밀한 분석을 통해, 그 상관관계 밝혀져야 할 것이다.

향후 장기 현장 실험을 통해 자료를 축적하고 WAsP에서 고려하는 많은 종류의 변수들을 조정하여 우리나라의 지형과 대기에 맞는 예측을 수행해 나가야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지관리공단 기술개발본부가 지원한 "풍력 발전 성능 평가 기준 기반 구축 연구"의 일부이며 연구에 도움을 주신 제주 대학 외 여러 관계자 분께 감사드립니다.

참고문헌

1. P.S. Jackson and J.C.R. Hunt (1975) "Turbulent Flow over a Low Hill", *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 101 929-955
2. P. J. Mason and J. C. King (1985) "Measurements and Predictions of Flow and Turbulence over an Isolated Hill of Moderate Slope", *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 111 617-640
3. P. J. Mason and R. I. Sykes (1979) "Flow over an Isolated hill of moderate slope", *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 105, 383-395
4. Erik L. Petersen, M. G. Mortensen (1998) "Wind Power Meteorology. Part 1: Climate and Turbulence", *Wind Energ.*, 1 2-22
5. Erik L. Petersen, M. G. Mortensen, (1998) "Wind Power Meteorology. Part 2: Siting and Models", *Wind Energ.*, 1 55-72
6. H.G. Kim, N.H. Kyong and C.M. Lee (1994) "Numerical Analysis of the Flow over a Hill", *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting II* 223-238.
7. Ib Troen and Erik L. Petersen (1989) "European Wind Atlas", *Risø National Laboratory* 15-35
8. P.J. Mason (1986) "Flow over the Summit of an Isolated Hill", *Boundary-Layer Meteorol.* 37 385-405
9. Helmut P. Frank, Erik L. Petersen (1999) "Calculation on the Wind Climate in Northern Finland : the Importance of Inversions and Roughness Variations during the Seasons", *Wind Energy* 2 113-123, Risø National Laboratory, Denmark