

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
 Journal of the Korean Solar Energy Society  
 Vol. 23, No. 4, 2003

# 복잡지형에서의 WAsP 예측성 향상 연구

경남호\*, 윤정은\*\*, 장문석\*, 장동순\*\*, 허종철\*\*\*

\* 한국에너지기술연구원  
 \*\* 충남대학교 환경공학과  
 \*\*\* 제주대학교 기계공학과

## A Refinement of WAsP Prediction in a Complex Terrain

Kyong, Nam Ho\*/ Yoon, Jeong Eun\*\*/ Jang, Moon Seok\*/ Jang, Dong Soon\*\*/ Huh, Jong Chul\*\*\*

\* Korea Institute of Energy Reserch (nhkyong@kier.re.kr, msjang@kier.re.kr)

\*\* Chungnam University, Dept. of Environmental Engineering (yje0920@kier.re.kr, p\_dsjang@cnu.ac.kr)

\*\*\* Cheju University, Dept. of Mechanical Engineering (jchuh@cheju.cheju.ac.kr)

### Abstract

The comparative performance of the WAsP in calculating the wind climate in complex terrain has been examined in order to test the predictability of the wind resource assessment computer code in our country. An analysis was carried out of predicted and experimental 10-min averaged wind data collected over 18 months at four monitoring sites in SongDang province, Jeju island, composed of sea, inland flat terrain, a high and a low slope craters. The comparisons show that the WAsP predictions give better agreement with experimental data by adjusting the roughness descriptions, the obstacle list.

**Keywords :** 웨이블 분포(Weibull Distribution), 풍황 자원(Wind Resource), 바람장미(Wind Rose), 복잡지형(Complex terrain), 장애물(Obstacle)

### 기호 설명

$C$  : 웨이블 분포의 Scale parameter[m/s]  
 $k$  : 웨이블 분포의 Shape factor[-]  
 $u$  : 풍 속[m/s]  
 $\alpha$  : the power law exponent

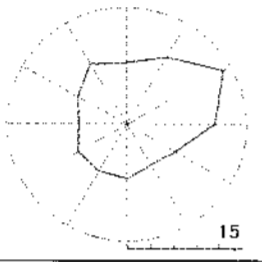
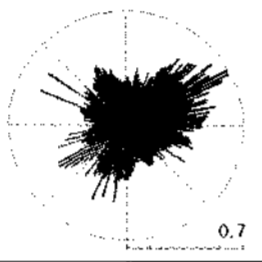
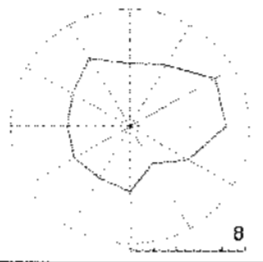
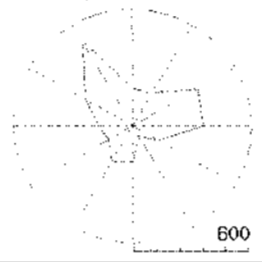
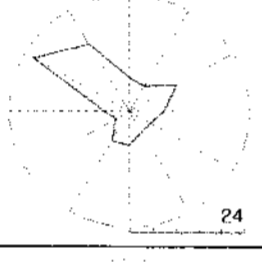
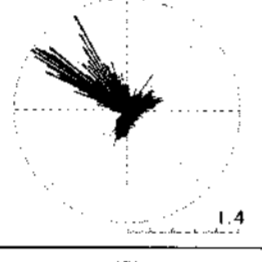
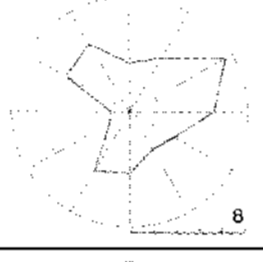
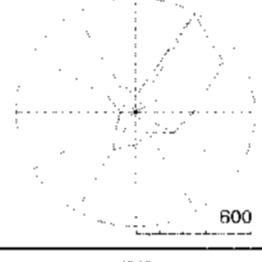
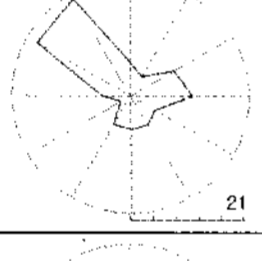
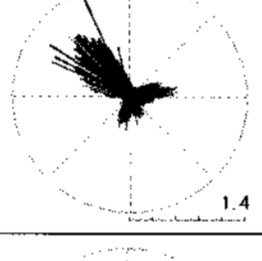
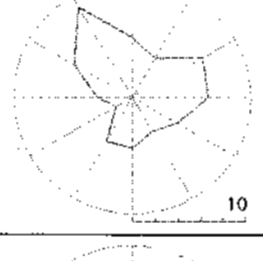
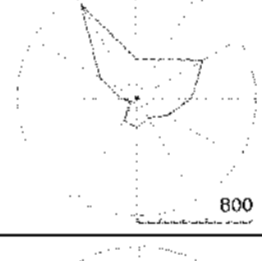
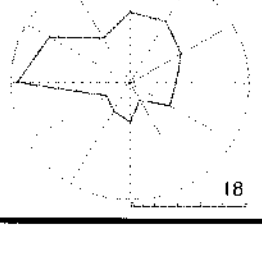
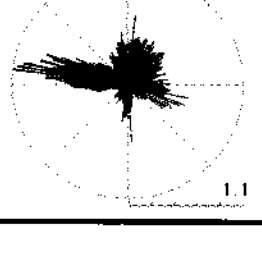
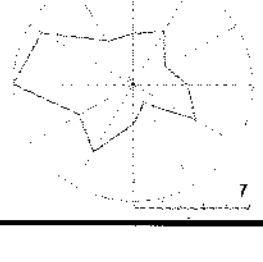
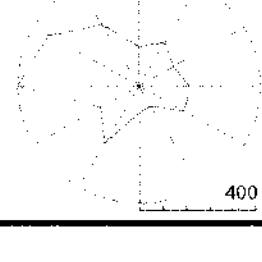
### 1. 서론

향후 풍력 발전 시스템의 보급을 위해서는 풍황의 정확한 평가가 필요하며, 데이터가 부족한 국내 현실에서는 고가의 기상탑을 설치하여 측정하기 보다는 풍황 예측 코드를 활용하는 것이 바람직하다. 그러나, 풍황 예측 코드를 사용하기 위해서는 다양

표 1. 풍향 분석 결과 (18개월, 웨이블 분포와의 오차율 [%])

측정 지점	위치		고도 [m]	C [%]	K [-]	평균풍속 [m/s]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	최대속도 [%]	0m/s [%]	회수율 [%]
	위도	경도								
두산봉	33°28' 57"	126°53' 04"	112	6.8	1.72	6.13 (0.63)	313.21 (0.13)	35.3	0.51	93.0
두문포	33°29' 37"	126°54' 33"	6	6.8	1.74	5.98 (0.94)	298.68 (0.13)	37.2	1.03	99.2
토끼섬	33°31' 16"	126°53' 58"	3	7.3	1.64	6.60 (0.72)	413.46 (0.07)	37.4	1.01	98.6
종달리	33°30' 21"	126°52' 41"	35	6.0	1.64	5.43 (1.34)	226.16 (0.16)	32.0	1.03	97.8

표 2. 측정지점의 바람장미 (18개월)

측정지점	발생빈도 [%]		평균풍속 [m/s]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	특 성
	30° 간격	1° 간격			
두산봉					북서풍의 발생빈도는 내륙의 지표 거칠기에 의해 감소되었지만 풍력밀도는 높다. 동쪽에 위치한 바다로 인해 동풍의 증가를 볼 수 있다.
두문포					발생빈도는 북서풍이 가장 높지만 지미봉에 의한 에너지감소가 뚜렷하다. 바다로 인한 북동풍의 풍력밀도가 높다.
토끼섬					가장 낮은 지표 거칠기를 가지는 지점으로 해변에 위치하여 북서풍이 가장 강한 뚜렷이 나타난다.
종달리					서풍이 우세하다. 장애물이 존재하지 않는 방향이 서쪽이며, 장애물에 의한 바람의 감소를 잘 보여준다.

한 지형에서 측정된 데이터와 예측치와의 비교, 검토를 통한 타당성 분석이 반드시 필요하다. 본 연구에서 바다, 평지 및 산지가 있는 다양한 형태의 지형이 동시에 존재하는 제주도 송당 지역에 4개의 측정지점을 선정하고 풍향의 예측능을 분석하였다.

같은 지역에 대해 3개월의 측정 데이터를 사용하여 예측을 수행한 바에 이어<sup>1)</sup>, 보다 장기간의 데이터와 정확한 현장 탐사를 바탕으로 풍향 예측 코드로서 가장 널리 사용되고 있는 덴마크 Risø 연구소의 WAsP (Wind Atlas Analysis and Applica

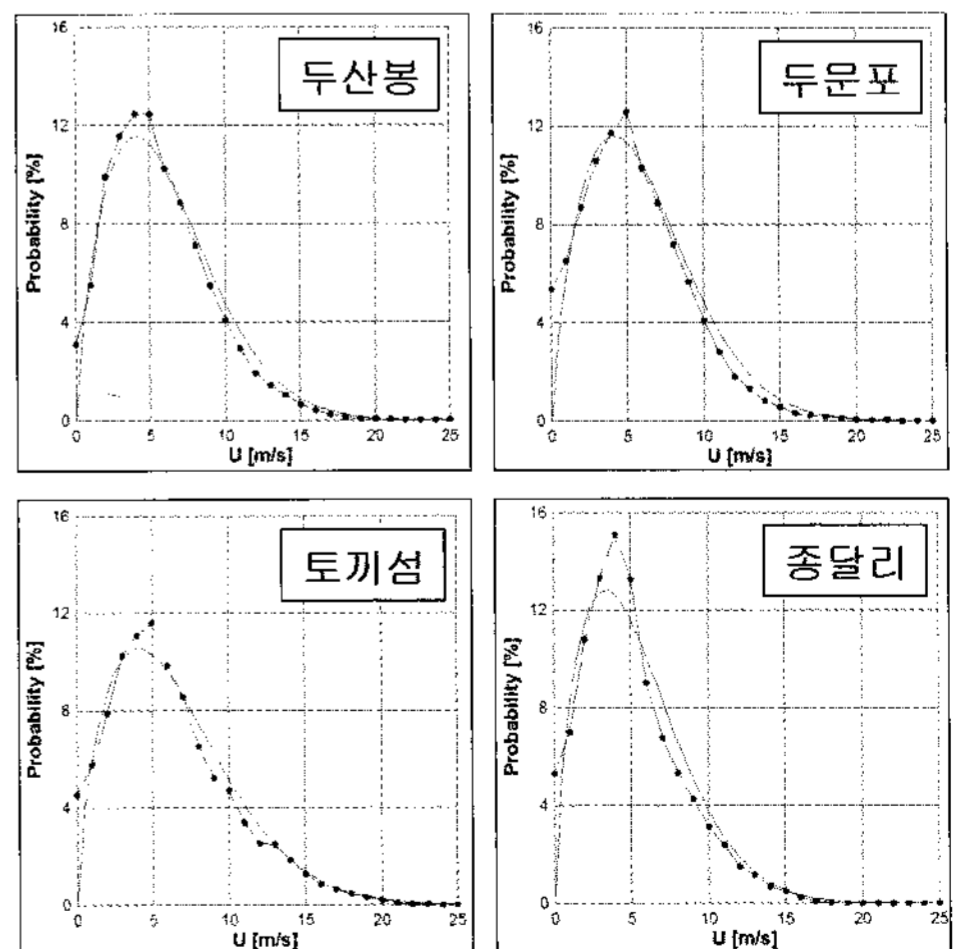


그림 1. 실측 probability와 웨이블 분포의 비교 (18개월, ● : 실측치, — : 웨이블 분포)

1) N.H. Kyong, J.E. Yoon "An Assessment of WAsP Prediction in a Complex Terrain" J. Korean Solar Energ. Sci. 23, 1, 39-47 (2003)

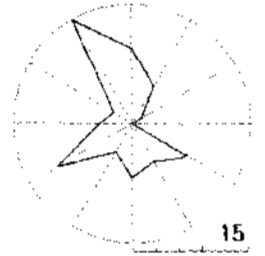
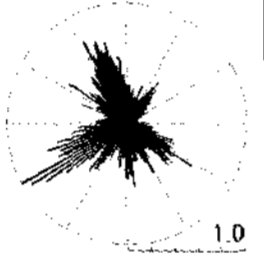
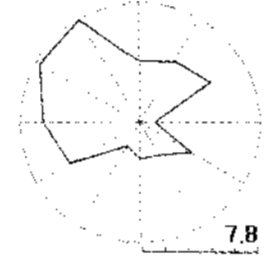
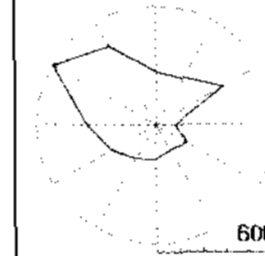
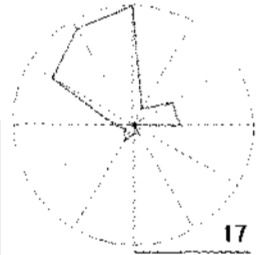
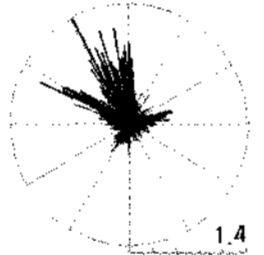

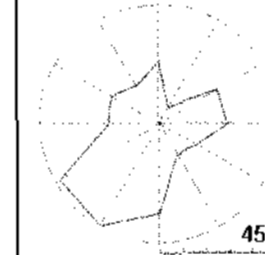
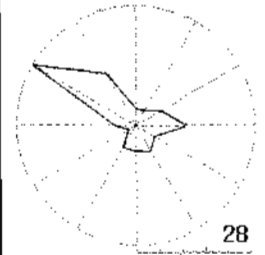
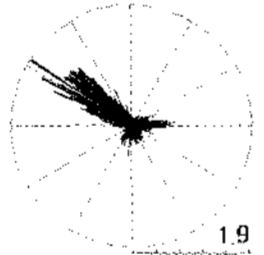
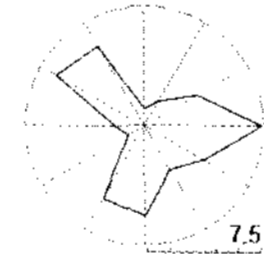

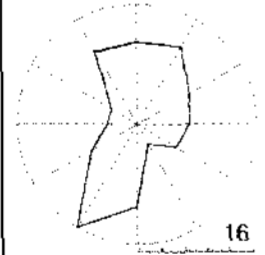
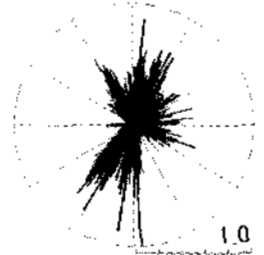
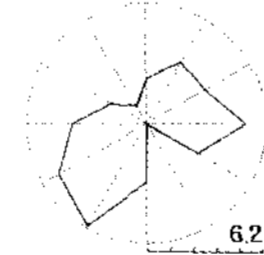

-tion Program)을 이용하여 풍황 예측의 정확도를 평가하고 국내에서의 WAsP 적용 가능성을 평가하였다.

불 분포가 데이터를 잘 표현하고 있다는 것을 의미한다. 2) 네 지점의 오차율이 최대 1.34%, 평균 0.515%로 매우 낮은 값을 가진다. 3) 선행 연구와 비교해 볼 때, 보다 장기간의 데이터가 보다 낮은

표 3. 풍황 분석 결과 (3개월, 웨이블 분포와의 오차율 [%])

측정 지점	위치		고도 [m]	C [m/s]	K [-]	평균풍속 [m/s]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	최대속도 [m/s]	0m/s [%]	회수율 [%]
	위도	경도								
두산봉	33°28'57"	126°53'04"	112	7.1	2.0	6.17 (1.61)	288.39 (0.22)	21.2	1.96	96.1
두문포	33°29'37"	126°54'33"	6	6.6	2.02	5.66 (3.48)	231.66 (0.24)	20.2	4.27	99.5
토끼섬	33°31'16"	126°53'58"	3	6.9	1.89	5.99 (1.50)	278.00 (0.20)	19.8	3.88	99.6
종달리	33°30'21"	126°52'41"	35	5.4	1.76	4.78 (1.22)	152.35 (0.29)	17.8	3.71	93.6

표 4. 측정지점의 바람장미 (3개월)

측정지점	발생빈도 [%]		평균풍속 [m/s]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	특 성
	30° 간격	1° 간격			
두산봉	 15	 1.0	 7.8	 600	발생빈도는 북서풍과 남서풍이 높으나, 평균풍속과 풍력밀도는 북서풍으로 일정하게 나타난다.
두문포	 17	 1.4	 7.2	 450	북서풍의 발생빈도가 현저히 높으나 바람에너지는 남서풍이 강하다. 이는 지미봉에 의한 북서풍의 에너지 감소로 인한 것이다.
토끼섬	 28	 1.9	 7.5	 440	북서풍의 발생빈도가 현저히 높으나 에너지는 남서풍과 동풍과 거의 같은 수준이다.
종달리	 16	 1.0	 6.2	 260	남서풍이 가장 많이 발생하며 에너지는 남서풍과 서풍이 가장 높다.

## 2. 현장 실험

측정 기기와 측정 지점에 대한 정보는 선행 연구와 동일하다. 측정기간은 약 18개월(2002년 2월 26일~2003년 7월 2일)이며, 데이터 회수율은 평균 97.1%이다(표 1).

웨이블 분포의 평균속도, 풍력밀도와 실측치와의 차를 의미하는 오차율이 낮을수록 데이터 수집 상태가 양호하며, 예측에 실질적으로 사용되는 웨이

오차율을 가짐을 알 수 있다. 그림 1과 그림 2에서도 확인할 수 있다.

18개월 데이터 분석 결과(표 1, 표 2)로부터 다음을 알 수 있다.

- 2) Erik L. Petersen, M. G. Mortensen "Wind Power Meteorology. Part 1: Climate and Turbulence". Wind Energ., 1 2-22 (1998)
- 3) 경험적으로 3%이하의 오차율이 요구된다. 덴마크 Risø Laboratory (WAsP Course, 2002년 11월)

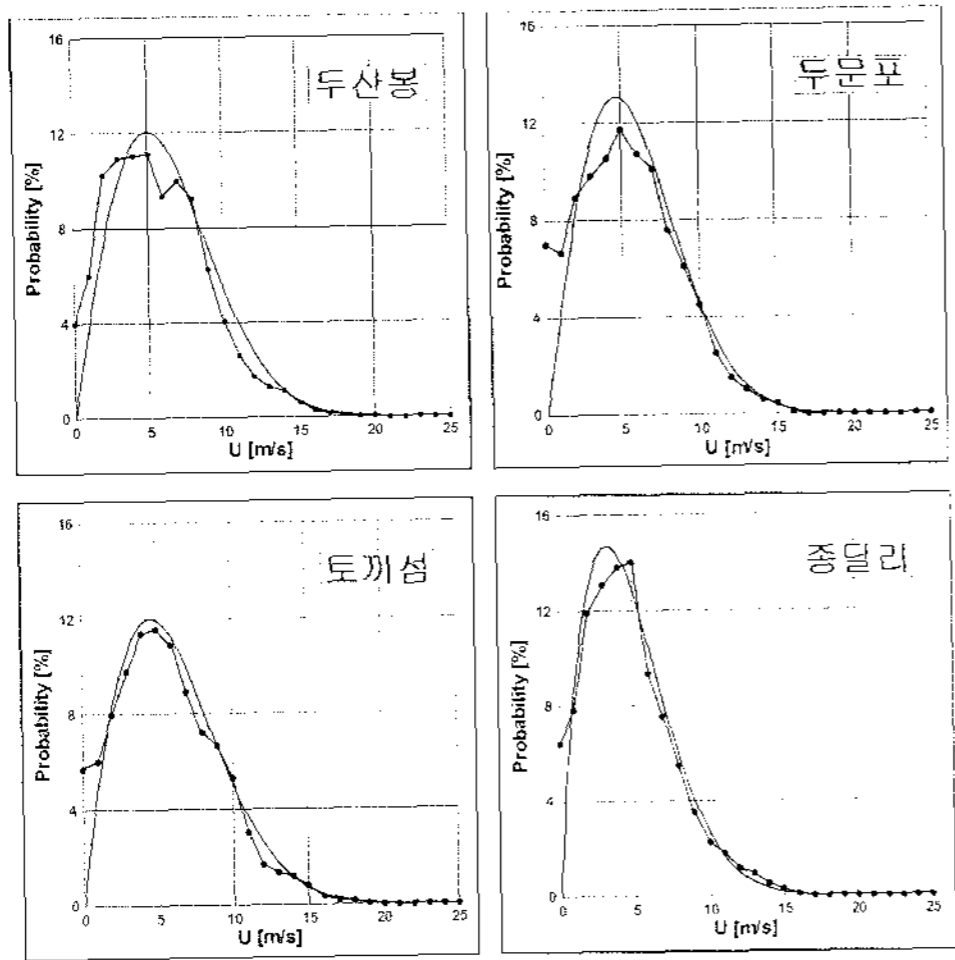


그림 2. 실측 probability와 웨이블 분포의 비교 (3개월, ● : 실측치, — : 웨이블 분포)

평균속도와 풍력밀도의 최대값은 토끼섬에서, 최소값은 종달리에서 측정되었다. 같은 평지에 위치하고 같은 대기 조건을 가진다하여도 장애물의 존재 유무와 지표 거칠기의 크기에 의해 풍력 자원이 얼마나 달라질 수 있는지를 보여준다. 두산봉은 내륙에 위치하지만 두 번째 큰 풍력 밀도 가지는데 이는 언덕에 의한 speed-up effect에 의한 현상으로 해석될 수 있다.

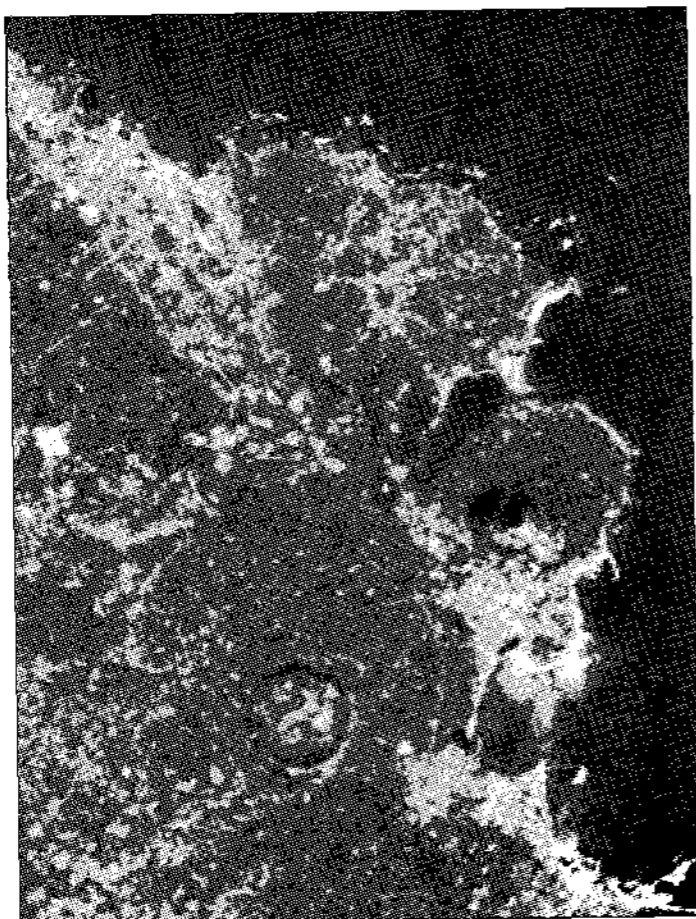


그림 3. 위성 영상

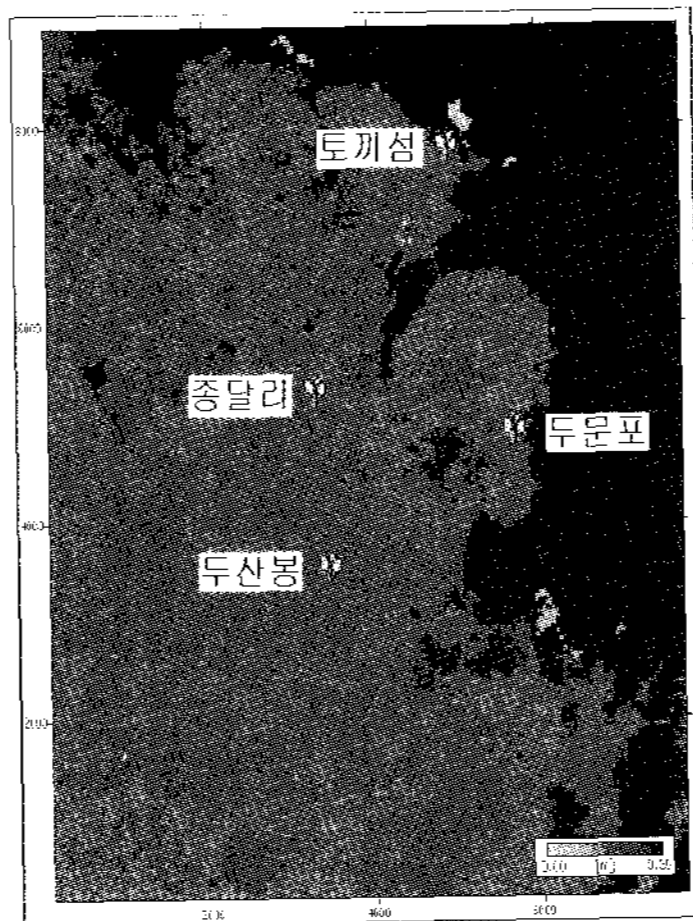


그림 4. 거칠기 지도

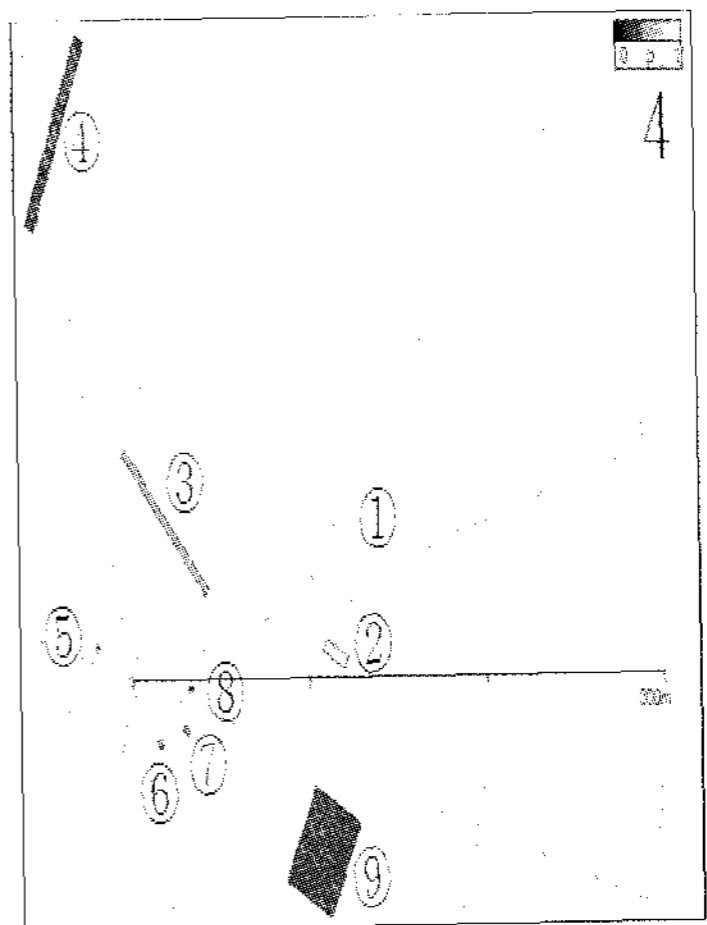


그림 5. 종달리 지점의 장애물 도식

바람장미의 발생빈도의 풍향 간격은 측정 간격과 동일한 1°와 WAsP의 예측에 사용되는 30° 간격을 함께 표시하였다.

웨이블 분포와 실측 풍속 빈도 분포의 비교(그림 1)에서, 종달리의 k는 1.64로 밀집된 분포형태를 가지며, C는 6.0m/s로 그래프가 낮은 풍속 구간에서 높은 발생빈도를 가진다. 이는 종달리 측정 지점 주변의 표면 거칠기와 장애물에 의해 빠른 풍속의 경우 마찰저항이 커서 경계층 내의 풍속강하가 크고, 느린 풍속인 경우 마찰저항이 적기 때문에 상대적으로 웨이블 분포가 밀집된 형태로 나타나고 있는 것으로 판단된다. 이 두 가지 특성 모두 지표 거칠기와 장애물에 의한 풍력 자원의 감소를 보여준다.

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 지형적 데이터

풍황 데이터와 함께 예측 수행을 위해 요구되는 데이터는 다음과 같다.

- 1) 유동에 영향을 주는 계산 영역의 지형
  - 2) 건물과 식생에 의해 결정되는 표면 거칠기
  - 3) Wake effect를 발생시키는 장애물
- 각각 국립지리원의 수치 지도로부터 얻은 등고

지도4)와 한국항공우주연구원 아리랑 위성 1호의 전자광학카메라 영상(그림 4)과 현장탐사를 바탕으로 한 거칠기 지도(그림 5), 장애물 목록(그림 6, 표 3) 형식의 데이터로 주어진다.

위성 영상은 510~730 nm 파장대역에서 지상의 흑백 영상을 수집, 6.6 m의 해상도를 가진다. 위성 영상에 대한 보다 자세한 사항은

표 5. 종달리 지점의 장애물 목록

장애물	A <sub>1</sub> [°]	R <sub>1</sub> [m]	A <sub>2</sub> [°]	R <sub>2</sub> [m]	폭 [m]	높이 [m]	공극률
1 창고	65	127	71	107	8	23	0
2 주택	83	110	85	107	4	13	0
3 수목	356	77	55	50	3	3	0.5
4 수목	340	167	341	163	20	71	0.35
5 나무	296	22	300	22	4	3	0.5
6 나무	144	25	148	25	4	3	0.5
7 나무	120	32	124	32	4	3	0.5
8 나무	94	31	98	31	4	3	0.5
9 수목	110	109	129	110	10	28	0.35

<http://kompsat.kari.re.kr> 에서 얻을 수 있다.

지표 거칠기는 바다, 논밭, 숲, 건물에 대해 각각 0.0m, 0.15m, 0.2m, 0.3m으로 설정하였다.<sup>5)</sup>

장애물 목록(그림 5와 표 5)은 장애물의 위치와 크기, 공극률을 나타내며, 위치는 측정지점을 중심으로 장애물의 첫 번째 모서리의 각 A<sub>1</sub>과 거리 R<sub>1</sub>, 두 번째 모서리까지의 각 A<sub>2</sub>와 거리 R<sub>2</sub>로 입력된다. 작은 측정지점을 중심으로 북쪽에서 모서리까지의 시계방향의 각도를, 거리는 측정지점을 중심으로 모서리까지의 반지름 길이를 의미한다. 공극률은 장애물의 전체 면적에 대한 공극의 비를 의미하며, 건물은 0, 나무는 0.5 이하의 값을 가진다.<sup>[13]</sup>

4) 그림 9. N.H. Kyong, J.E. Yoon "An Assessment of WAsP Prediction in a Complex Terrain" J. Korean Solar Energy Sci. 23, 1, 39-47 (2003)

5) 덴마크 Risø Laboratory의 경험상수를 도입하였다. (WAsP Course, 2002년 11월)

표 6. 자기 예측의 결과 (18개월)

	평균풍속 [m/s]	오차율 [%]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	오차율 [%]
두산봉	6.09	0.6	315	-0.5
두문포	6.00	0.3	297	-0.5
토끼섬	6.61	0.1	409	-1.0
종달리	5.40	-0.5	226	0.07

표 7. 상호 예측의 결과 (18개월)

예측 지점	측정 지점	평균풍속 [m/s]	오차율 [%]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	오차율 [%]
두산봉	두문포	6.34	3.4	364	16.2
두산봉	토끼섬	6.21	1.3	344	9.8
두산봉	종달리	6.44	5.0	400	27.7
두문포	두산봉	5.92	-1.0	284	-4.9
두문포	토끼섬	5.85	-2.1	281	-5.9
두문포	종달리	5.90	-1.3	278	-6.9
토끼섬	두산봉	6.36	-3.6	377	-8.8
토끼섬	두문포	6.81	3.1	424	2.5
토끼섬	종달리	6.44	-2.4	370	-10.5
종달리	두산봉	5.21	-4.0	201	-11.1
종달리	두문포	5.54	2.0	229	1.2
종달리	토끼섬	5.43	0.0	222	-1.8

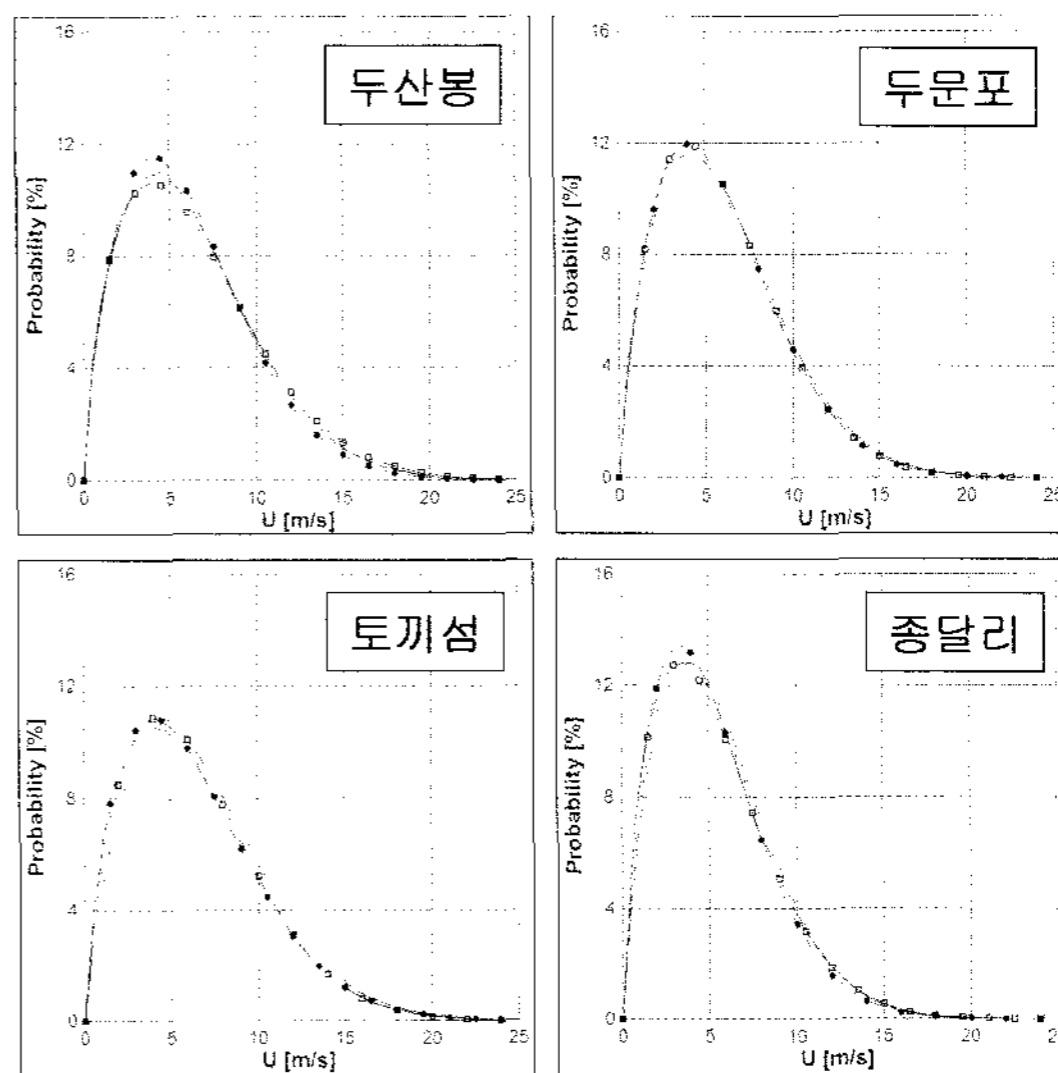


그림 6. 상호 예측 웨이블 분포 비교 (18개월)

● : 두산봉, — : 두문포, - - - : 토끼섬, □ : 종달리

### 3.2 시뮬레이션 결과

자기예측(표 6)은 네 지점 모두 1%이하의 오차를 가져 상당히 높은 예측 정확도를 가진다. 상호예

측(표 7)은 예측지점으로 분류된 지점의 측정치와 측정지점으로 분류된 세 지점으로부터의 예측치를

표 8. 자기 예측의 결과 (3개월)

	평균풍속 [m/s]	오차율 [%]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	오차율 [%]
두산봉	6.04	-2.1	289.7	0.4
두문포	5.10	-9.8	165.1	-28.7
토끼섬	5.37	-10.3	202.8	-27.0
종달리	4.03	-15.6	97.6	-35.9

표 9. 상호 예측의 결과 (3개월)

예측 지점	측정 지점	평균풍속 [m/s]	오차율 [%]	풍력밀도 [W/m <sup>2</sup> ]	오차율 [%]
두산봉	두문포	5.41	-12.3	213.8	-25.8
두산봉	토끼섬	5.15	-0.1	193.0	-33.8
두산봉	종달리	4.78	-22.5	176.5	-38.8
두문포	두산봉	5.78	2.1	244.7	5.6
두문포	토끼섬	4.80	-0.1	151.3	-34.6
두문포	종달리	4.53	-19.9	137.9	-40.4
토끼섬	두산봉	6.37	6.3	348.1	25.2
토끼섬	두문포	5.71	-0.05	220.1	-20.8
토끼섬	종달리	4.77	-20.3	153.6	-44.7
종달리	두산봉	5.36	12.1	201.0	31.9
종달리	두문포	4.76	0.0	133.5	-12.3
종달리	토끼섬	4.49	-6.0	123.9	-18.6

비교하여 나타내었다. 평균풍속 예측 오차율은 모든 지점에 대해 5%내이며, 풍력밀도 예측 오차율은 두산봉을 예측한 경우를 제외하고 최대 약 10% 정도의 오차를 가진다. 상호 예측 웨이블 분포 그래프(그림 6)에서도 적은 예측 오차를 확인할 수 있다.

약 3개월의 풍황 데이터와 해안선을 따라 내륙과 바다의 거칠기를 각각 1.5m, 0.0m으로 설정하고, 장애물을 고려하지 않았던 이전의 연구 결과(표 8, 표 9)와 비교해 볼 때, 예측오차가 현저히 감소한 것을 알 수 있다.

## 6. 결과 및 토의

풍황 예측 코드의 타당성 분석과 국내 적용가능성을 평가하기 위해 제주도 송당 지역에 총 4개의 측정 지점을 선정하고, 18개월과 3개월의 풍황 데이터를 바탕으로 예측을 수행하고 그 예측 정확도를 분석하였다(표 10). 측정 기간과 계산 영역에 대한 데이터를 달리하여 예측 정확도의 변화를 분석하였다.

예측 정확도의 개선은 장기간의 데이터를 확보함으로써 얻어지는 웨이블 분포와 실측 풍속 분포 간의 오차율 감소와 위성사진과 현장 탐사 등 적용대상 영역의 조사를 통해 얻어진 데이터를 기반으로 한

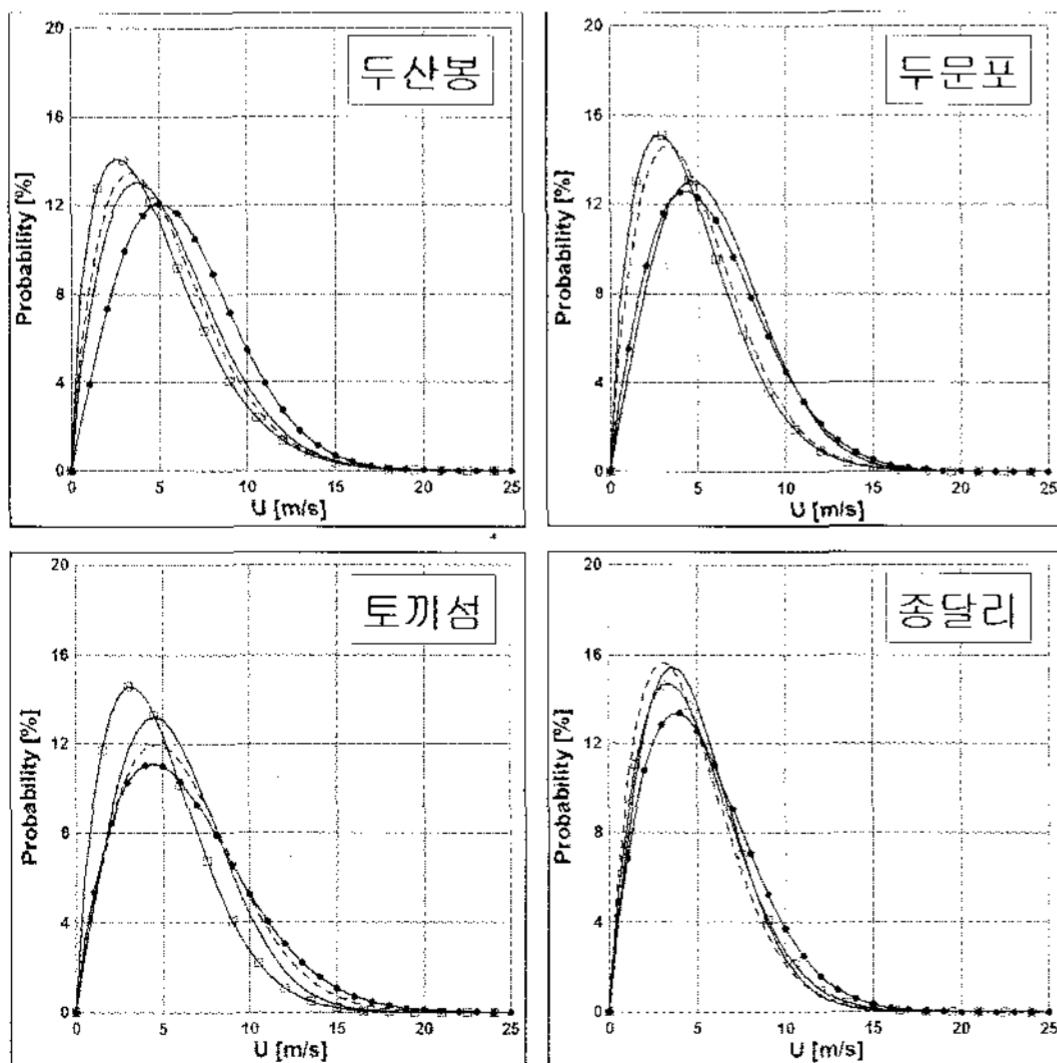


그림 7. 상호 예측 웨이블 분포 비교 (3개월, ●:두산봉, —:두문포, - - -:토끼섬, □:종달리)

표 10. 예측 오차율의 평균치 비교 [%]

	18개월		3개월	
	평균풍속	풍력밀도	평균풍속	풍력밀도
자기예측	0.4	0.5	7.6	33.2
상호예측	2.4	8.9	7.1	33.1

지표 거칠기 수치 적용, Wake를 유발하는 장애물의 고려를 통하여 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

보다 나은 예측 정확도를 위해서는 적용 변수들에 의한 예측능력의 변화에 대한 보다 세밀한 분석을 통해 그 상관관계를 밝혀져야 할 것이며, 또한 보다 다양한 지형과 대기조건에 대한 예측 수행이 필요할 것이다.



## 후 기

본 연구는 한국에너지관리공단 기술개발본부가 지원한 "풍력 발전 성능 평가 기준 기반 구축 연구"의 일부이며, 2003년도 제주대학교 발전기금 연구 교수지원계획에 의한 것이다.

## 참 고 문 헌

1. P.S. Jackson, J.C.R. Hunt "Turbulent Flow over a Low Hill", Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 101 929-955 (1975)
2. P. J. Mason, J. C. King "Measurements and Predictions of Flow and Turbulence over an Isolated Hill of Morderate Slope", Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 111 617-640 (1985)
3. P. J. Mason, R. I. Sykes "Flow over an Isolated hill of moderate slope", Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 105, 383-395 (1979)
4. E. L. Petersen, M. G. Mortensen "Wind Power Meteorology. Part 1: Climate and Turbulence", Wind Energ., 1 2-22 (1998)
5. E. L. Petersen, M. G. Mortensen "Wind Power Meteorology. Part 2: Siting and Models", Wind Energ., 1 55-72 (1998)
6. H.G. Kim, N.H. Kyong, C.M. Lee "Numerical Analysis of the Flow over a Hill", Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting II 223-238 (1994)
7. Ib Troen, E. L. Petersen "European Wind Atlas", Risø 15-35 (1989)
8. P.J. Mason "Flow over the Summit of an Isolated Hill", Boundary-Layer Meteorol. 37 385-405 (1986)
9. H. P. Frank, Erik L. Petersen "Calculation on the Wind Climate in Northen Finland : the Importance of Inversions and Roughness Variations during the Seasons", Wind Energ. 2 113-123, Risø, Denmark (1999)
10. J. C Surez, B. A Gardiner, C. P Quine "A Comparison of three methods for predicting wind speeds in complex forested terrain" Meteorol. Appl. 6, 329-342 (1999)
11. N.H. Kyong, J.E. Yoon, H.J. Chul, J.D. Soon "An Assessment of WAsP Prediction in a Complex Terrain" J. Korean Solar Energ. Sci. 23, 1, 39-47 (2003)
12. KOMPSAT EOC User's Manual, 2000, KARI
13. WAsP User's Manual, 2003, Risoe