

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 24, No. 3, 2004

행원 풍력발전단지의 WAsP 적용 및 평가

변수환*, 고경남**, 허종철**

*한국수력원자력(주)(bsh1222@cheju.ac.kr), **제주대학교 청정에너지사업단(gnkor2@cheju.ac.kr),
***제주대학교 기계공학과(jchuh@cheju.ac.kr)

Application and Assessment of WAsP for Haengwon Wind Farm

Byun, Su-Hwan*, Ko, Kyung-Nam** and Huh, Jong-Chul***

*KHNP(bsh1222@cheju.ac.kr), **Clean Energy Education Center, Cheju National Univ.(gnkor2@cheju.ac.kr),
***Dept. of Mech. Eng, Cheju National Univ.(jchuh@cheju.ac.kr)

Abstract

Using WAsP, which is PC-program for the vertical and horizontal extrapolation of wind data, annual energy production as well as wind energy density has been predicted for Haengwon wind farm in Jeju island. The predicted results were compared with real data derived from wind turbines in Haengwon wind farm. As the results, in order to produce more electric power, new wind turbines should be located along coastal line, which has comparatively high wind energy density. Also, the roughness length should be inputted to the Map Editor program for better agreement with real annual energy production.

Keywords : WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), 연간에너지생산량(Annual Energy Production), 와이불 분포(Weibull distribution), 표면 거칠기(Surface roughness), 후류손실(Wake loss)

기호 설명

- u : 풍속 (m/s)
- A : 와이불 분포 함수의 척도계수 (m/s)
- K : 와이불 분포 함수의 형상계수

1. 서론

산업화가 진행될수록 인간은 더 많은 가용 에너지를 필요로 하지만 지구상의 화석연료는 한정된 에너지이다. 더욱이 환경보전에 대한 인류의 관심이 높아지면서 국제사회는 국제 기후변화협약 등 국제적인 환경규제를 강화하고 있다. 이에 따라 많

은 국가에서 대체에너지 생산과 환경보전을 고려한 풍력에너지기술 개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라도 최근 제주도 행원지역에 풍력발전단지를 조성하여 이용률(Capacity Factor) 약 25%~30%를 기록하며 상업화에 성공, 현재 운전 중에 있다.¹⁾²⁾

풍력발전단지의 선정은 다년간의 기상데이터를 수집하고 분석하여 적절히 행하여야 하고, 더욱이 선정된 풍력발전단지 내에서도 풍력발전기를 각각 어떻게 배치해야 하는지를 결정하는 것도 매우 중요하다. 그러나 풍력발전단지의 설계는 관련 파라메타들과의 복잡한 상호관계로 인하여 쉽지 않은 실정이다.

WAsP(Wind Atlas Analysis and Application Program)은 덴마크의 RISØ 국립연구소에서 개발되어 세계 70여 개국에서 풍력자원평가를 위한 프로그램으로 사용되고 있다. WAsP은 바람데이터를 분석하여 풍력에너지 자원량을 예측하고, 또한 이를 바탕으로 지도상의 원하는 위치에 임의의 풍력발전기를 세우거나 풍력발전단지를 조성하였을 때 어느 정도의 출력을 얻을 수 있는지를 예측할 수 있는 프로그램이다.³⁾

행원 풍력발전단지는 설계 당시 WAsP이 국내에서 거의 이용되지 않았으므로 다른 방법에 의해 설계되었다. 그러나 이미 조성된 행원 풍력발전단지를 대상으로 WAsP의 예측정도와 이용가능성을 파악하는 것도 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 제주도 행원 풍력발전단지를 대상으로 DGPS-53 수신기와 지도편집(Map Editor) 프로그램을 이용하여 좀더 정확한 디지털지도를 작성한 후 WAsP(Ver. 8)을 이용하여 행원 풍력발전단지에서의 성능을 예측하고 실제 측정된 데이터와 비교·분석하고자 한다. 이를 통하여 풍력발전기의 적합한 설치장소를 검토하고, 나아가 한국지형에서 WAsP의 이용가능성과 한계를 파악하고, 보완·수정방향도 제시하고자 한다.

2. WAsP의 개요

WAsP은 바람데이터의 수평, 수직적 외삽을 위한 PC-프로그램이다. 다양한 지형 및 바람의 흐름을 변화시키는 요소들을 나타내기 위하여 WAsP은 거칠기 모델, 산악지형 모델 및 장애물 모델을 포함하고 있다. 데이터처리 과정은 크게 raw data의 분석, wind atlas data의 생성, wind climate의 예측, 풍력에너지 잠재량 예측, 풍력발전단지의 출력계산 등 5단계로 구성되어 있다. 그림 1에 WAsP의 전형적인 구동 예를 보여준다.

WAsP은 Troen⁴⁾의 BZ 모델과 지도편집 프로그램을 통해 분석지점에서의 유동 섭동 프로필을 얻는다. 사각 격자가 아닌 원형 격자를 사용하며, 풍속과 풍향 측정데이터는 30° 간격의 12개 섹터에 저장된다. WAsP은 이렇게 저장된 데이터를 각 섹터별로 상류의 지표 거칠기와 장애물의 영향 등을 고려하여 풍속분포의 확률 밀도 함수인 와이불 분포의 집합 즉, Wind Atlas를 만든다.

풍속 빈도 분포의 수학적 모델 중 가장 적절하게 이용되고 있는 와이불 분포 함수는 다음과 같다.

$$P(u) = \frac{K}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{K-1} \text{EXP} - \left(\frac{u}{A}\right)^K \quad (1)$$

여기서 u 는 풍속이다. A 는 척도계수이며, 풍속의 평균치에 비례하는 상수이고, K 는 형상계수이며, 풍속의 편차의 크기를 나타내는 상수이다.

또한, WAsP에서 사용되는 연간에너지생산량(AEP)에 관한 식은 다음과 같다.

$$P = \sum_i \frac{P_{i+1} - P_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} (G_k(\alpha_{i+1}) - G_k(\alpha_i)) \quad (2)$$

여기서, $\alpha_i = u_i/A$ 이고, $G_k(\alpha)$ 는 $1/K$ 과 α^K 의 불완전 감마함수의 $1/K$ 배이다.

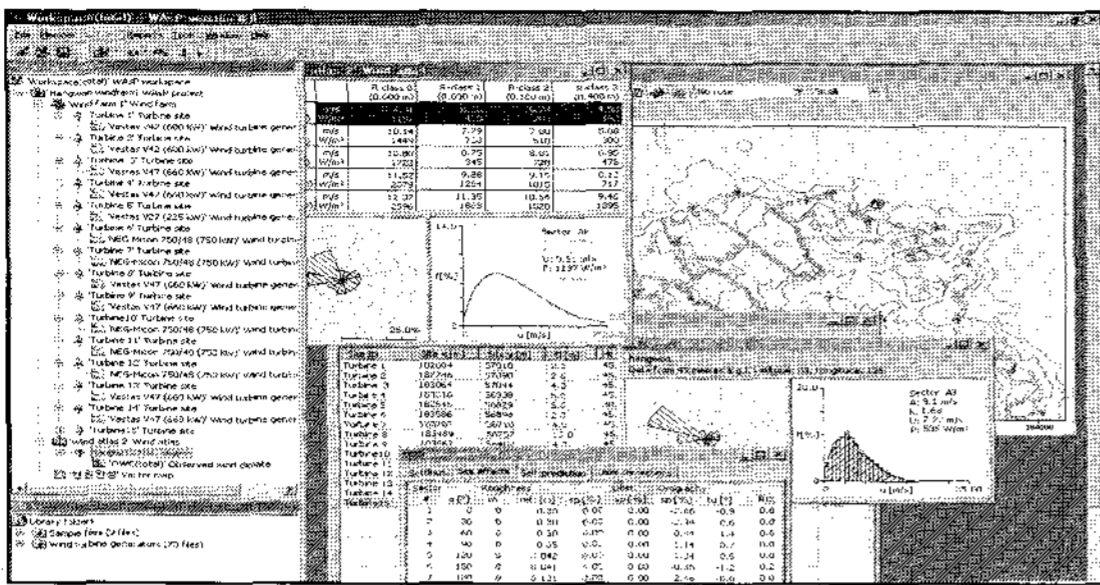


그림 1. WAsP

3. 현장 실험

3.1 측정 장비

행원 풍력발전단지에는 풍력발전기의 허브높이가 30m인 5호기를 제외하여 45m인 풍력발전기가 14기로, 총 15기가 설치 되어있다. 정확한 예측을 위해 풍력발전기의 허브높이에서 풍속을 측정해야하므로, 5호기를 제외한 나머지 풍력발전기의 허브높이와 같은 45m의 기상측정마스트를 설치하여 운영하였다. 마스트에 장착된 계측장비(NRG #9300 Wind Data Logger)는 신호선을 통해

표 1. 측정센서의 특성

Sensor	Raw Sensor Output	9300 Data Output Range	9300 Resolution
Maximum #40 Anemometer	0~120 Hz	0~91.63 m/s	0.271 %
200P Wind Direction Vane	0~10 k ohm 0~2.5 V 8° dead band about north	0~359 degrees	0.271 %
110S Temperature Sensor	0~2.5 V	-40~52.5 °C	0.271 %
LI-200SA Li-Cor Pycnometer	80~100A / 100 W/m ²	0~3000 W/m ²	0.271 %
BP-20 Pressure Sensor	0~5 V	78.5~108.6 kPa	0.271 %

표 1에 나타난 센서들과 연결되어 지속적으로 풍속 및 풍향데이터를 수집하게 된다. 일정기간이 지난 후, 데이터가 저장된 메모리 카드를 회수하고 컴퓨터로 자료를 읽고 분석하는 과정을 거치게 된다.⁵⁾

특히, 본 연구에서는 행원 풍력발전단지내의 각 풍력발전기와 장애물들의 정확한 위치와 크기, 형태를 측정하기 위해 Garmin사의 DGPS-53 수신기를 이용하였다.⁶⁾ DGPS-53 수신기는 1초에 한번 좌표 값을 수신 받고, 본 연구에서는 고정된 위치에서 5분 동안 측정된 두 차례의 평균값을 좌표 값으로 취하였다. 그림 2에 DGPS-53 수신기의 외관과 풍력발전기의 위치를 측정하는 모습을 나타내었고, 그 정밀도는 표 2와 같다.

3.2 측정지점

행원 풍력발전단지는 제주도 북제주군 구좌읍 행원리에 위치하고 있으며, 그림 3은 한국항공우주연구원 아리랑 위성 1호가 전자광학카메라(EOC)로 촬영한 행원지역 위성사진이다. 이 지역은 북동쪽으로는 바다와 인접해 있고, 남서쪽으로는 언덕과 산이 없는 평지지형을 이루고 있는 곳으로 WAsP에서 유동박리가 일어나지 않는 지형조건을 만족한다.⁷⁾⁸⁾ 왼편에는 행원 농공단지과 마을부락, 그리고 대규모의 양식장시설이 위치하고 있으며, 완만한 능선과 약 10m 높이의 수풀로 구성되어 있다.

DGPS-53 수신기로 계측된 각 풍력발전기와 기상측정마스트의 정확한 위치 좌표가 디지털지도에 입력되었다. 디지털지도는 국립지리원에서 제공하는 행원지역의 등고선 지도를 이용하였고, 그림 4에 그 결과를 나타낸다.

전체적으로 행원지역에 설치된 풍력발전기는 먼저 설치된 1호기에서 9호기까지는 행원지역의 해안가를 따라 활처럼 구부러진 형태로 배치되어 있으며, 나중에 설치된 10호기부터 15호기까지는 내륙지역 쪽으로 배치되어 있음을 알 수 있다.

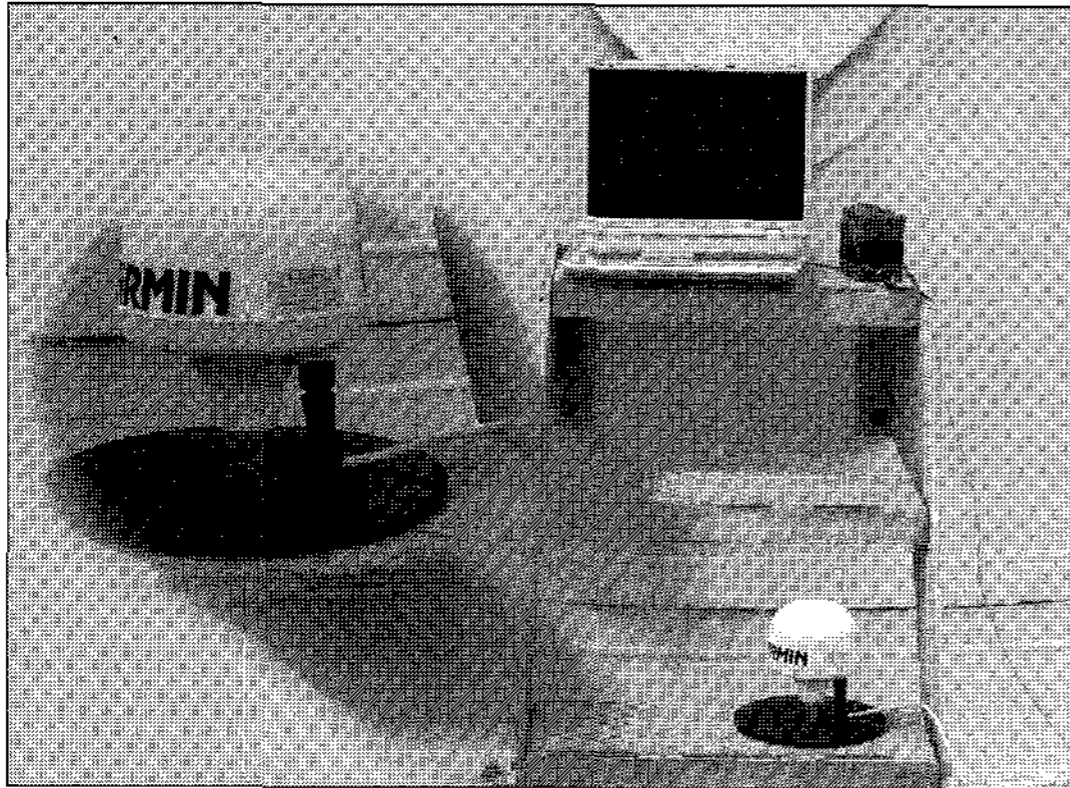


그림 2. DGPS-53의 외관 및 위치측정의 예

표 2. DGPS-53수신기의 정밀도

Error range (m)	0.5	3	5
Precision(%)	5	50	95

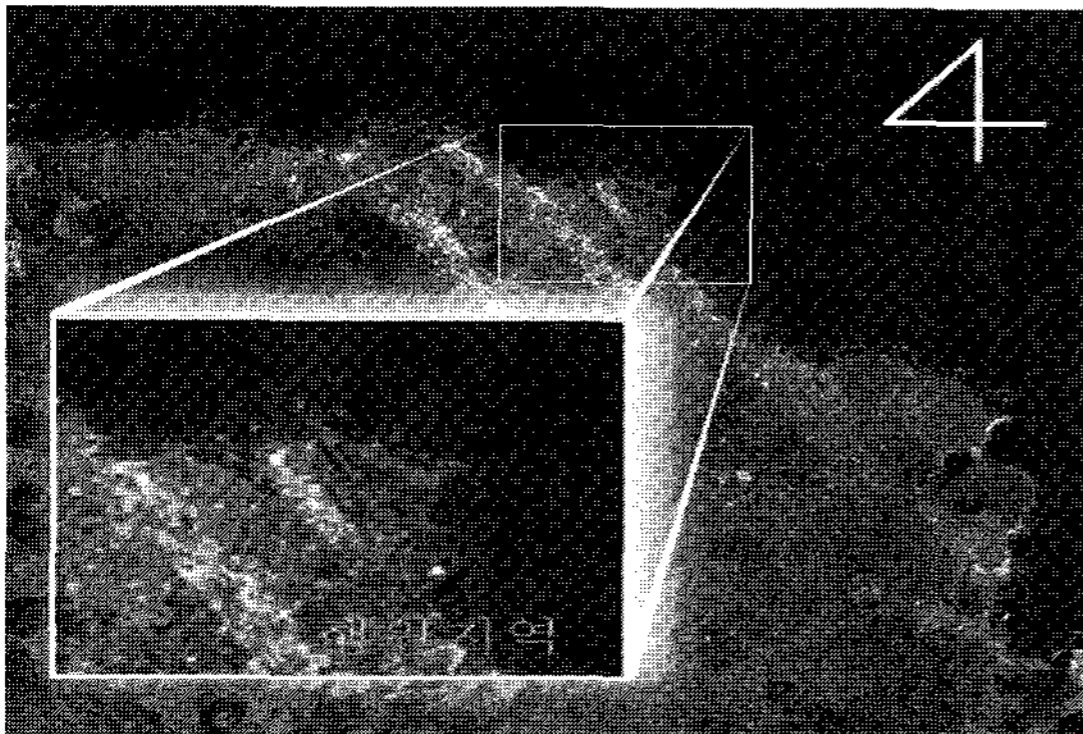


그림 3. 제주 행원의 EOC 영상

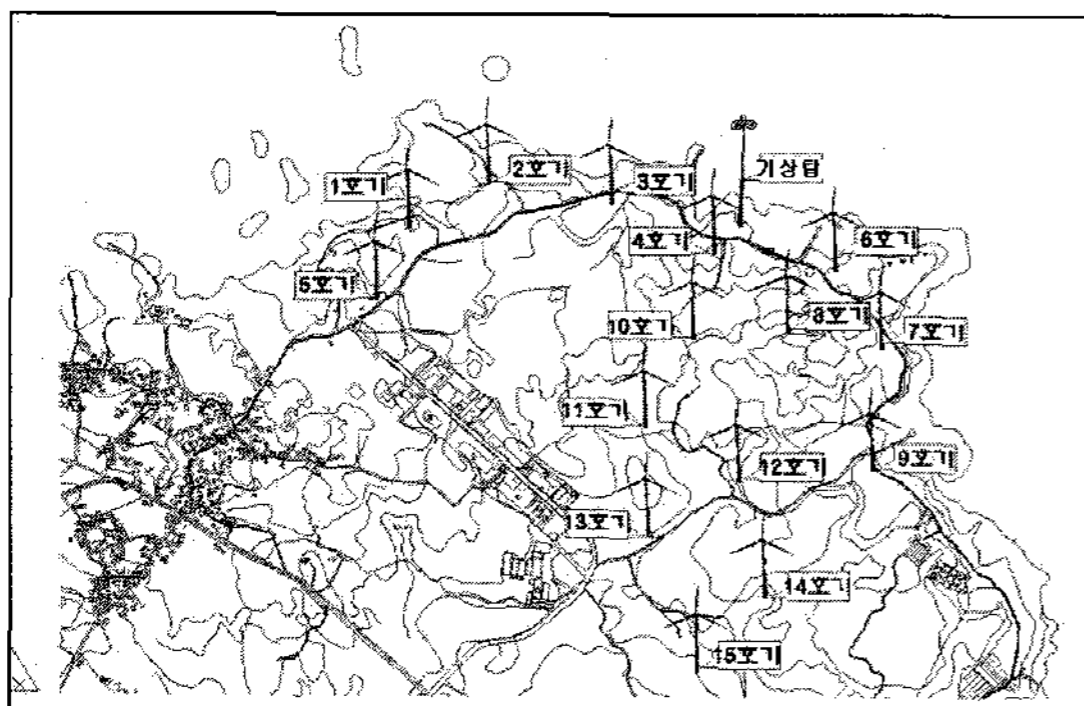


그림 4. 행원지역 풍력발전기 위치도

3.3 데이터 분석

풍황데이터는 2002년 7월 1일부터 2003년 6월 30일까지 1년간 수집되었고, WAsP으로 분석되었다. 측정지점의 바람장미와 와이불 분포에 대한 결과를 그림 5에 나타낸다. 바람장미에서 검은색 부분은 표면 거칠기와 풍력발전기들의 영향으로 인한 후류손실의 정도를 나타내고 있다. 행원지역의 주 풍향은 북서풍이고, K는 1.74, A는 7.7 m/s인 와이불 분포를 이루고 있으며, WAsP에서 가정하고 있는 안정적인 주 풍향 및 풍속분포가 와이불 분포를 이루어야 하는 것을 만족한다.⁷⁾⁸⁾

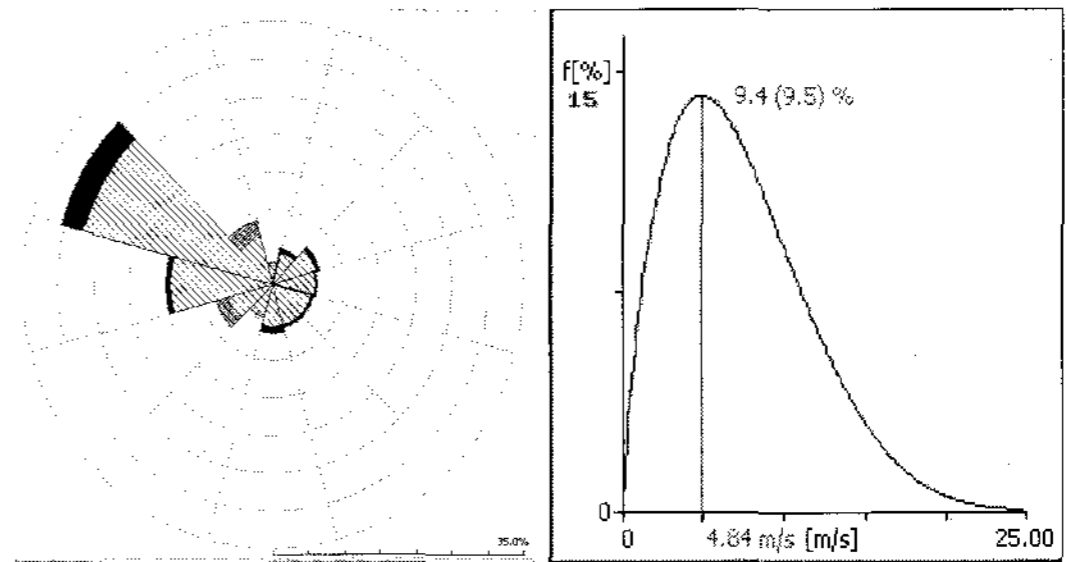


그림 5. 바람장미와 와이불 분포

3.4 Simulation

WAsP에서는 풍력발전단지 내에 어떤 물체가 존재할 경우, 즉 해당물체 높이의 50배내에 측정지점이 존재하고, 동시에 측정지점 높이의 1/3 이상인 물체가 존재할 경우에는 장애물(obstacle)로 설정하고, 바람의 유동에는 영향을 미치나 전술한 기준에 미치지 못했을 경우에는 거칠기 길이(roughness length)로 설정한다.⁹⁾ 행원지역에는 높이가 15m 이상 되는 건물이나 나무 등이 존재 하지 않으므로 거칠기 길이로 설정하였다. 거칠기 길이는 바다를 0.00m로 정하고, 논밭, 나무숲은 각각 0.2m, 0.35m, 양식장, 모니터링하우스는 0.5m로 설정하였고, 또한 행원마을, 행원 농공단지는 0.8m로 설정하였다. 그림 6은 지도편집 프로그램에서 행원 지역의 디지털지도상에 표면 거칠기를 설정한 모습이다.

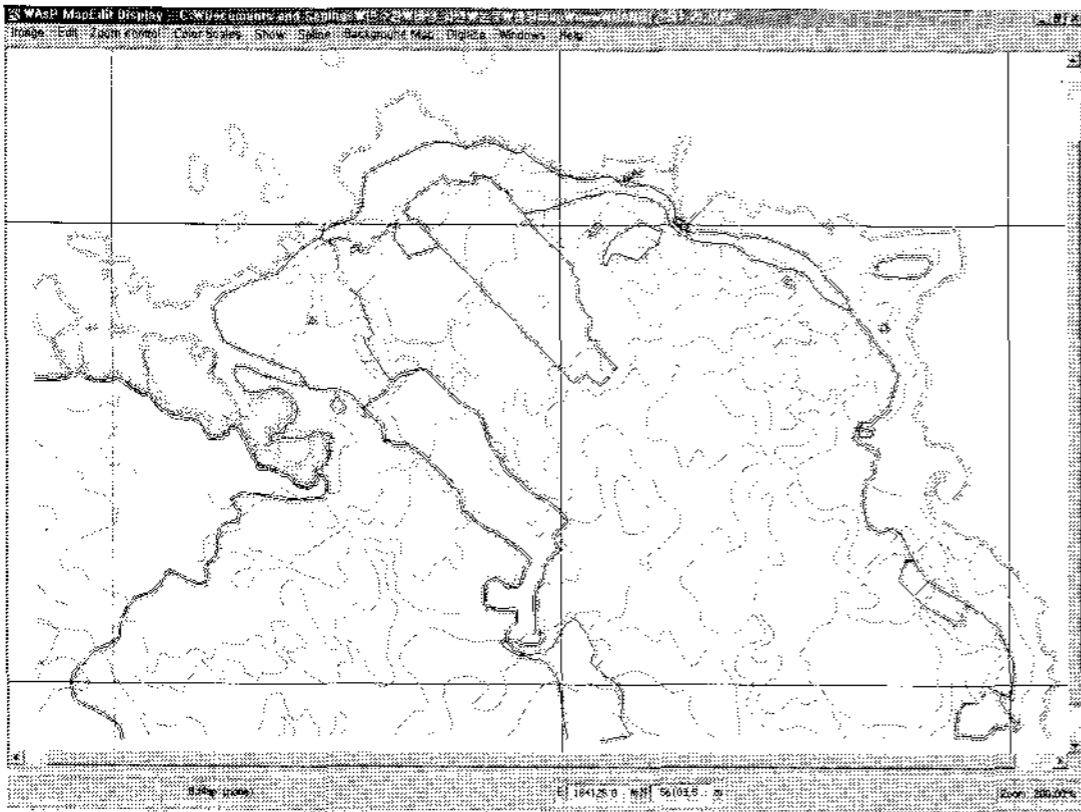


그림 6. 행원지역의 표면 거칠기

4. 결과 및 고찰

그림 7은 행원 풍력발전단지 내에서의 예측된 평균풍속과 풍력에너지밀도를 보여주고 있다. 색이 짙은 곳일수록 평균풍속과 풍력에너지밀도가 낮은 지형을 나타내고, 색이 옅은 곳일수록 높은 평균풍속과 풍력에너지밀도가 존재함을 의미한다.

행원 풍력발전단지의 풍력에너지밀도의 분포는 바다와 해안가를 따라 높은 풍력에너지밀도를 나타내고 있고, 내륙지역일수록 풍력에너지밀도가 낮아지고 있다. 특히, 모니터링하우스 근처인 3호기, 4호기, 6호기 근처에 많은 풍력에너지밀도가 분포하고 있고, 해안가와 멀리 떨어진 13호기, 14호기, 15호기에는 평균치이하의 분포상태를 보이고 있다. 행원 마을주변에는 마을 건물들로 인하여 풍력에너지밀도가 매우 낮아짐을 확인할 수 있다.

그림 8은 각 풍력발전기의 위치에 따른 방위별 풍력에너지밀도와 후류손실을 보여준다. 행원지역은 비교적 지형이 완만하므로 거의 모든 풍력발전기에서의 방위별 풍력에너지밀도가 유사하게 나타나고 있다. 주로 북서풍과 약간의 동풍, 북북서풍, 서북서풍에 의한 풍력에너지밀도가 분포하고 있다. 주풍향이 북서풍이므로 4호기, 7호기, 8호기, 9호기, 10호기, 12호기, 14호기가 주풍향쪽에 위치한 풍력발전시스템의 후류 영향권에 있음을 보여주고

있다. 후류손실은 8호기가 총 11.29%로 가장 높고 거의 모든 방위각에 대하여 나타나고 있다. 이 결과는 8호기가 4호기, 6호기, 7호기, 10호기에 둘러싸여 있고, 또한 다른 곳 보다 많은 식생이 분포하고 있기 때문에, 그 결과 표면 거칠기의 영향을 받아서 높은 후류손실이 발생하고 있다고 분석할 수 있다.

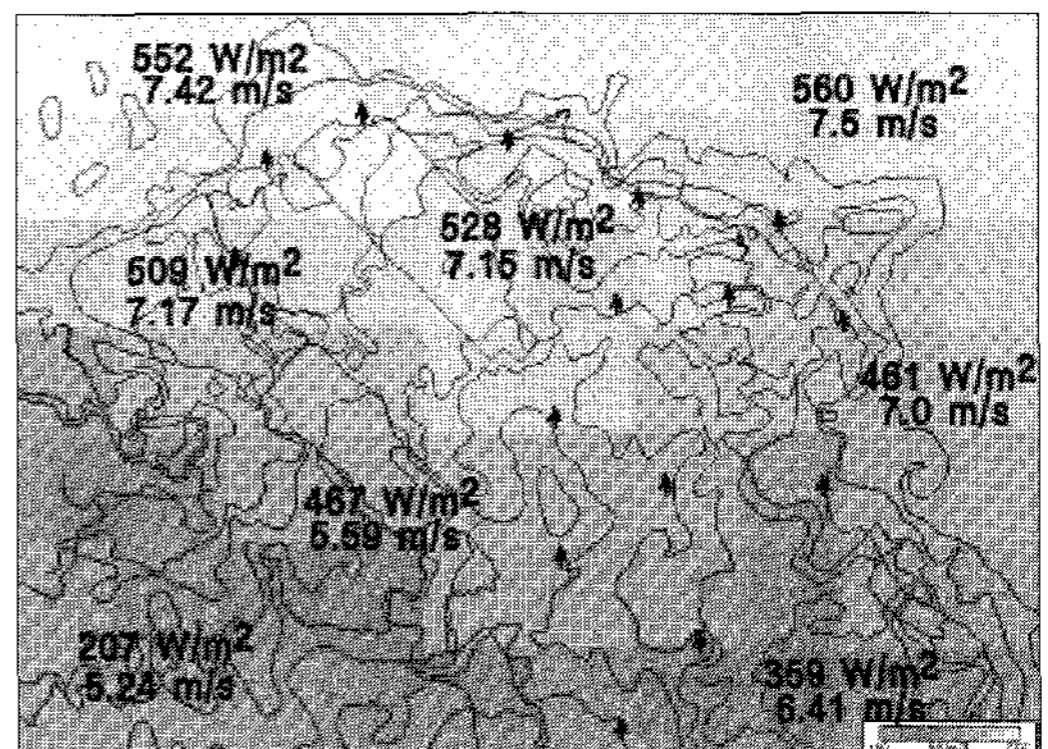


그림 7. 풍력에너지밀도와 평균풍속

따라서 향후 행원지역에 풍력발전시스템을 추가로 건설 할 경우, 풍력에너지밀도가 상대적으로 높은 해안가에 인접하여 설치할 필요가 있고, 북서쪽 방향에 기존의 풍력발전시스템이 존재할 때에는 충분한 이격거리를 두고 건설하는 것이 후류손실과 발전량 손실을 최소화 할 수 있는 방법이라고 사료된다. 장기간 데이터 축적과 분석을 통해 구체적인 이격거리가 밝혀져야 할 것이다.

그림 9는 행원 풍력발전단지의 각 풍력발전기로부터 측정된 실제 연간에너지생산량과 WAsP에서 계산된 예상 연간에너지생산량을 비교한 그림이다. 이 그림은 또한 WAsP에서 거칠기 길이의 설정유무에 따라 다르게 예측된 연간에너지생산량을 보여주고 있다. 행원 풍력발전단지는 1998년에 1, 2호기를 시작으로 2003년까지 총 15기를 설치하였지만, 10호기부터 15호기까지는 이 연구기간 동안 설치되지 않았거나 설치 중이었으므로, 해당 풍력발전기들에 대한 결과는 제외 시켰다. 또한, 심각한

결손이 발생한 달은 다른 해의 데이터를 이용하여 비례식으로 계산하였다.

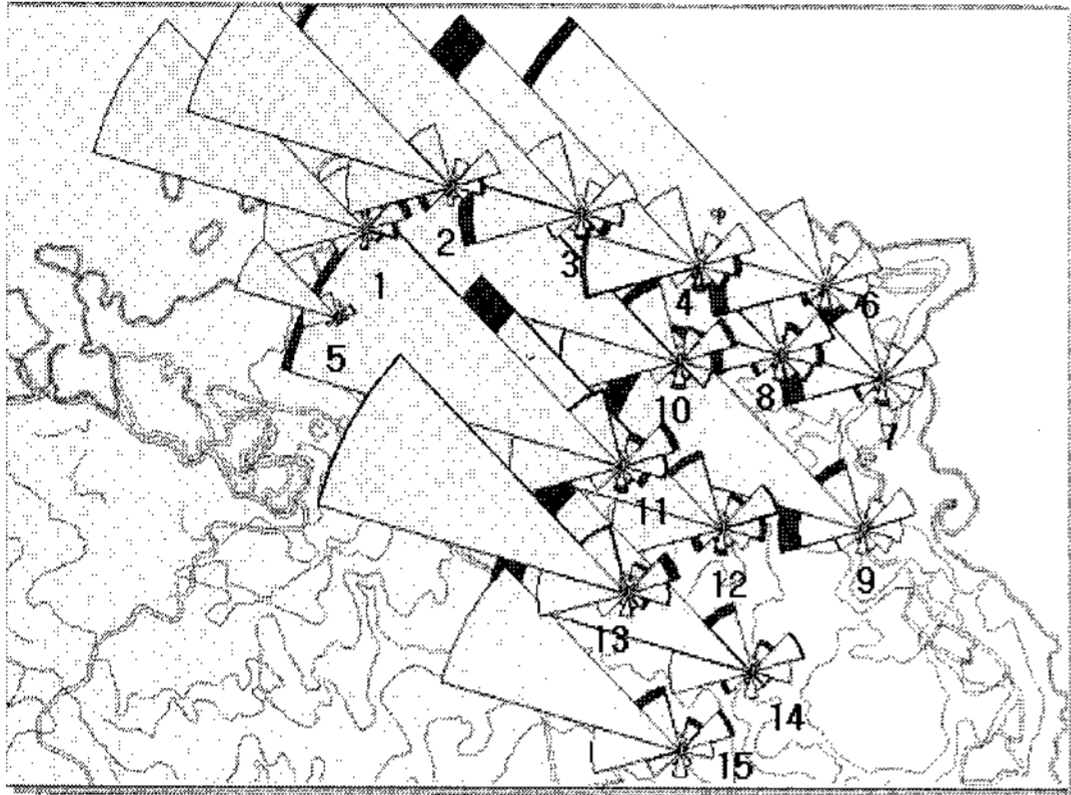


그림 8. 각 풍력발전기에서 풍력에너지밀도와 후류손실

실제 연간에너지생산량, 즉 실제 연간발전량과 WAsP의 예상 연간발전량과의 오차는 약 2%에서 30%까지 차이를 보이고 있다. 1호기, 2호기, 3호기, 5호기는 주풍향 쪽이 해안가로 장애물이 없으므로 거칠기길이의 설정 유무에 따른 차이가 거의 없다. 반면 나머지 호기들은 주풍향 쪽에 장애물이 존재하여 거칠기길이를 설정하였을 경우, 보다 더 실제 발전량에 근접하고 있음을 알 수 있다.

전체적으로 실제 연간발전량과 예상 연간발전량은 그 경향이 비슷하게 나타나고, 거칠기 길이를 설정하였을 때에 보다 실제 연간발전량에 근접함을 확인할 수 있다. 따라서 보다 실제 연간발전량에 가깝게 예측하기 위해서는 장기간 데이터 축적 및 분석을 통해 적절한 거칠기길이를 찾아 적용하여야 할 것이다.

실제 연간발전량과 WAsP에서의 예상 연간발전량과의 오차발생 원인은 다음과 같이 분석할 수 있을 것이다. 즉, WAsP으로부터 예측된 결과는 총 15기의 풍력발전기들에 대한 계산결과이므로 설치되지 않았거나 설치 중이던 10호기부터 15호기까지의 후류손실도 포함된 결과이다. 그리고 풍력발전기의 운전기간 중 고장·수리 및 유지·보수를

위한 정지시간 등의 오차가 고려되지 않았고, 사용된 디지털지도의 정확도에 대한 완벽한 평가가 이루어지지 않았다. 또한 WAsP이 유럽지형을 바탕으로 제작되었으므로 거칠기 길이와 관련모델들도 유럽지형에 맞게 설정되어 있다. 따라서 한국 지형에 적합한 값으로 설정하기 어렵다는 문제점이 있다.

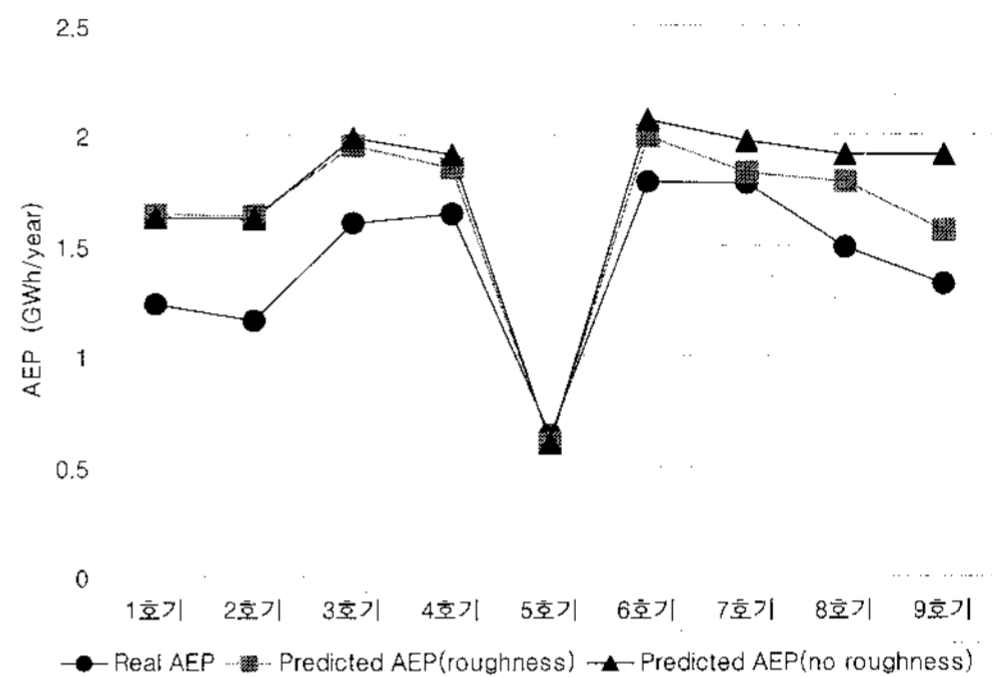


그림 9. 실제 AEP와 예측된 AEP의 비교

보다 정확한 예측을 위해서는 장기간 동안 데이터를 수집한 후, 전술한 오차요인들을 분석하여 보정하고, 여러 가지 WAsP의 변수를 한국지형에 맞게 적용시켜야 할 것이다.

따라서 WAsP에서 사용하는 각 모델들의 가정과 한계를 인식하고, 오차가 발생할 수 있는 요인들을 정확히 파악하여 고려한다면, 풍력발전단지를 건설하기 전에 그 발전량을 예측하고, 나아가 풍력발전기들의 최적배치를 파악하기 위한 보조수단으로 WAsP을 이용할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 WAsP을 이용하여 제주도 행원 풍력발전단지의 발전량을 예측하고 그 결과를 실제 측정된 결과와 비교·분석하였다. 그 결과 예상발전량과 실제발전량과의 오차가 발생하지만 그 경향이 비슷하고, 적절히 거칠기길이를 설정했을 때 실

제 발전량에 보다 가깝게 예측된다. 향후 장기간 데이터 축적과 분석을 통해 한국지형에 맞는 이격거리와 거칠기길이를 찾아야 할 것이다.

후 기

본 연구는 “제주도내 풍력발전단지 성능 모니터링 및 평가”과제의 일부이며 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 허종철 · 양윤석 · 김건훈, 제주행원 풍력발전단지 운전결과 분석, 제13회 신·재생에너지 WORKSHOP, pp.369-378, 2001
2. 김건훈 외, 제주도내 풍력발전단지 성능 모니터링 및 평가 III, 연구보고서, 제주도, 2004
3. Yu Fat Lun, Akashi Mochida, Shuzo Murakami, Hiroshi Yoshino, Taichi Shirasawa, Numerical simulation of flow over topographic features by revised k- ϵ models, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91, pp.231-245, 2003
4. I. Troen, E. L. Perterson, European Wind Atlas. Risø National Laboratory, Denmark, 1989
5. 경남호, 윤정은, 허종철, 장동순, 복잡지형에서의 WAsP예측성평가, 한국태양에너지학회논문집, Vol. 23, No. 1, pp.39-47, 2003
6. 김상철, 소형 무인 해양탐사선개발 및 항법에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, 2003. 8
7. P.J. Mason and R.I. Sykes, Flow over an Isolated hill of moderate slope, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 105, pp.383-395, 1979
8. Erik L. Petersen. M. G. Mortensen, Wind Power Meteorology, Part 1: Climate and Turbulence, Wind Energ., pp.12-22, 1998
9. Niels G. Mortensen, Duncan N. Heathfield, Lisbeth Myllerup, Lars Landberg, Ole Rathamann, Ib Troen and Erik L. Petersen, Wind Atlas Analysis and Application Program: The Standard in Wind Resource Calculation and Micro-siting, Risø National Laboratory, Denmark, 2003