

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

*Journal of the Korean Solar Energy Society*

Vol. 27, No. 4, 2007

# 남극 세종기지에서의 풍력자원 국소배치 민감도 분석

김석우\*, 김현구\*\*

\*한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 (wemins@kier.re.kr)

\*\*한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 (hyungoo@kier.re.kr)

## Sensitivity Analysis of Wind Resource Micrositing at the Antarctic King Sejong Station

Kim, Seok-Woo\*, Kim, Hyun-Goo\*

\*Wind Energy Research Group, Korea Institute of Energy Research

### Abstract

Sensitivity analysis of wind resource micrositing has been performed through the application case at the Antarctic King Sejong station with the most representative micrositing softwares: WAsP, WindSim and Meteodyn WT. The wind data obtained from two met-masts separated 625m were applied as a climatology input condition of micro-scale wind mapping. A tower shading effect on the met-mast installed 20m apart from the warehouse has been assessed by the CFD software Fluent and confirmed a negligible influence on wind speed measurement. Theoretically, micro-scale wind maps generated by the two met-data located within the same wind system and strongly correlated meteor-statistically should be identical if nothing influenced on wind prediction but orography. They, however, show discrepancies due to nonlinear effects induced by surrounding complex terrain. From the comparison of sensitivity analysis, Meteodyn WT employing 1-equation turbulence model showed 68% higher RMSE error of wind speed prediction than that of WindSim using the  $k-\epsilon$  turbulence model, while a linear-theoretical model WAsP showed 21% higher error. Consequently, the CFD model WindSim would predict wind field over complex terrain more reliable and less sensitive to climatology input data than other micrositing models. The auto-validation method proposed in this paper and the evaluation result of the micrositing softwares would be anticipated a good reference of wind resource assessments in complex terrain.

**Keywords** : 세종기지(King Sejong Station), 국소배치(Micrositing), 국소바람지도(micro-scale wind map), 민감도 분석(Sensitivity analysis)

접수일자 : 2007년 7월 13일, 심사완료일자:2007년 10월 5일

교신저자 : 김현구(hyungoo@kier.re.kr)

## 1. 서 론

남극 환경보호를 위한 마드리드 의정서를 준수함과 동시에 기지운영을 위한 청정 에너지원 확보를 목적으로 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단에서는 남극 세종기지에 10kW급 소형풍력발전기를 설치하였으며 극한 기상조건 하에서의 실증운전을 성공적으로 수행한 바 있다.<sup>1)</sup>

남극 세종기지 풍력발전기의 최적 설치위치를 선정함에 있어서 최초에는 세종기지 인근 기상관측탑의 기상자료와 평지지형에 적합한 선형이론모델인 WAsP<sup>2)</sup>를 이용하여 국소배치를 실시하였다.<sup>3)</sup> 그런데 안전성 문제로 인하여 풍력발전기 설치위치를 세종기지에서부터 625m 이격된 창고동 인근으로 변경함에 따라 풍력자원을 재평가하였으며 이때에는 복잡지형(complex terrain)을 고려한 전산유동모델인 WindSim<sup>4)</sup>을 이용하여 국소배치 및 풍환경 분석을 실시한 바 있다.<sup>5)</sup>

현재 풍력발전기의 최적 설치위치를 결정하는 국소배치(micrositing)는 선형이론해석법으로부터 전산유동해석법으로 전환되는 시점에 있다.

선형이론해석법은 지형굴곡의 변화가 미소하다고 가정하여 대기유동의 지배방정식인 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 선형화한 이론식<sup>6)</sup>으로 수평방향 풍속변화를 계산하고 수직방향으로는 평지 대기경계층의 경험식인 로그법칙을 적용한다. 그런데 지형경사 5도 이상부터는 선형해석과 비선형해석에 의한 풍속 예측값에 차이가

발생하여 점차 증폭되다가<sup>7) 8)</sup> 15도 이상에서는 유동박리가 발생하여<sup>9)</sup> 더 이상 선형모델을 사용할 수 없게 된다.

전산유동해석법(CFA; Computational Flow Analysis)은 나비에-스톡스 방정식과 난류방정식을 수치해석하여 3차원 평균유동장 및 난류유동장의 수치해(numerical solution)를 구하는 고차원 해석법이다.

최근 들어 전세계적으로 복잡지형에서의 풍력발전 단지개발이 가속화 됨에 따라 평균유동장의 변형 뿐만이 아니라 풍력발전기 내구성 측면에서 난류유동장의 정확한 파악이 대단히 중요한 사안으로 부각되고 있다. 이에 선형이론해석법과 전산유동해석법을 병용하여 복잡지형 국소배치 시 예측 결과의 오차를 상호비교하는 연구사례가 증가하고 있다. 그런데 이들 대부분은 기상탑 설치지점에 국한하여 측정된 풍속 연직분포와 국소배치 소프트웨어의 예측결과를 단순비교하거나<sup>10) 11) 12)</sup> RIX<sup>14)</sup>에 따른 민감도를 고찰하거나<sup>15)</sup> 풍향

1) 김석우, 경남호, 극한환경에서의 소형풍력발전 실증운전, 한국태양에너지학회 논문집, 26권, 4호, pp. 25-30, 2006.  
 2) Risoe Laboratory, <http://www.wasp.dk/>  
 3) 배재성, 장문석, 주영철, 윤정은, 경남호, 남극 세종기지의 풍력자원 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 25권, 3호, pp. 53-60, 2005.  
 4) WindSim AS, <http://www.windsim.com/>  
 5) 김석우, 김현구, 남극 세종기지의 전산유동해석에 의한 풍력자원평가, 한국태양에너지학회 논문집, 27권, 3호, 2007.  
 6) Jackson, P. S. and Hunt, J. C. R. Turbulent Wind Flow Over a Low Hill, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 101, pp. 929-955, 1975.

7) Ishihara, T., Yamaguchi, A. and Fujino, Y., A Nonlinear Model for Predictions of Turbulent Flow Over Steep Terrain, World Wind Energy Conference, Berlin, 2002.  
 8) Bowen, A. J. and Mortensen, N. G., WAsP Prediction Errors Due to Site Topography, Risoe National Lab., Risoe-R-995, 2004.  
 9) Wood, N., The Onset of Separation in Neutral, Turbulent Flow over Hills, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 76, pp. 137-164, 1995.  
 10) Watson, G., Doublas, N., Hall, S., Comparison of Wind Flow Models in Complex Terrain, World Renewable Energy Congress, 2005.  
 11) Llombart, A., Talayero, A., Mallet, A., Telmo, E., Performance Analysis of Wind Resource Assessment Programs in Complex Terrain, Int'l Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2006.  
 12) Berge, E., Gravdahl, A. R., Schelling, J., Tallhaug, L. and Undheim, O., Wind in Complex Terrain: A Comparison of WAsP and Two CFD-Models, European Wind Energy Conference, Athens, 2006.  
 13) Steinbach, E., Comparison of Measured Wind Profiles with WindSim Calculations, WindSim User Meeting, Tonsberg, 2007.  
 14) Ruggedness Index, 선형이론해석법의 적용성을 파악하기 위해 주변 지형의 경사도를 나타내는 지수

편차를 교차비교한<sup>16)</sup> 사례로, 지형이 복잡해질수록 전산유동해석법의 예측 정확도가 상대적으로 높아진다는 일반적인 결론을 내리고 있다.

한편 전형적인 복잡지형임에도 불구하고 풍력자원평가 시 선형모델만을 사용하고 있는 우리나라의 현상황은 매우 우려스럽다. 복잡지형에서의 풍력단지개발 시 국소배치의 불확도(uncertainty)가 매우 큼에도 불구하고<sup>17)</sup> 일부 민간상용단지의 개발사례를 제외하고는 국소배치 시 선형모델 이외의 해석을 수행 또는 병행한 사례를 찾아보기 힘들다. 또한 복잡지형에 대한 이해부족으로 풍력자원조사 시 국소배치 해석결과의 검증은 고려하여 측정설계를 한 경우는 전무하여 복잡지형 효과에 의한 설계오차는 풍력단지의 가동경력이 확보되어야만 사후에 확인 가능한 형국이다.

다만 지형경사가 완만한 평지지형의 경우에 선형모델 예측이 전산유동해석보다 실측에 근접한 사례가 있는데<sup>18)</sup> 이는 선형이론이 적합해서라기 보다는 로그법칙 풍속분포식에 기인한 결과로 사료된다. WindSim과 같은 전산유동해석법의 난류모델은 복잡지형에서 지면근처 유동변화가 심할 경우의 예측은 우수하지만<sup>19)</sup> 20) 평지 대기경계

층에서의 난류혼합과정에 의한 풍속분포를 재현하는 데에는 다소 문제가 있기 때문에 오히려 로그법칙이 유효할 수 있기 때문이다.<sup>21)</sup>

본 연구에서는 남극 세종기지의 풍력자원평가 사례를 통하여 설계기상자료에 따른 국소배치 소프트웨어의 민감도 분석(sensitivity analysis)을 실시하였다. 민감도 분석이라 함은 국소배치 시 설계자료 또는 입력자료에 따른 예측결과의 변화를 정량적으로 비교·분석함으로써 불확도를 파악하는 것을 말한다. 이를 위하여 수행된 연구내용을 요약하면,

- (1) 국소배치를 위한 설계조건으로 세종기지 인근 및 창고동 인근에 위치한 두 측정지점의 1년간 관측자료를 사용하였다. 이때 측정지점 간의 기상학적 상관성이 매우 높음을 확인하여 오차분석에 의한 자가검증(auto-validation)에 활용할 수 있음을 입증하였다(2.1절). 자가검증이라 함은 국소배치 해석 시 해석영역 내 두 지점 이상의 풍황자료를 설계조건으로 사용하여 복수개의 국소바람지도를 작성한 후 이들 간의 오차분석을 통하여 지형지물 영향도 및 측정지점 선정의 유효성 등을 검증하는 것을 말한다.
- (2) 세종기지 인근 측정지점으로부터 해안평지를 따라 625m 이격된 창고동 인근 측정지점은 건물의 영향이 예상되는 바, 전산유동해석을 실시하여 차폐영향을 파악하였다. 이를 통하여 측정지점에서 관측된 풍황자료는 오직 지형에 의한 효과만이 영향요소가 되도록 하였다(2.2절).
- (3) 세종기지 인근과 창고동 인근의 풍황자료를 설계조건으로 사용하여 각각 국소배치를 실시한 후 두 해석결과의 오차분석에 의한 자가검증

15) Llombart, A., Mallet, A., Burillo, N., Alvarez, O., Talayero, A., Influence of Orography on Wind Resource Assessment Programs, European Wind Energy Conference, Milano, 2007.

16) Albrecht, C. and Klesitz, M., Three-Dimensional Wind Field Calculation Above Orographic Complex Terrain in Southern Europe, European Wind Energy Conference, Athens, 2006.

17) McKay, D. C., Dealing with Uncertainty: Wind Resource Assessment, Environmental Finance Workshop, Toronto, 2005.

18) Steinbach, E., Comparison of Measured Wind Profiles with WindSim Calculations, WindSim User Meeting, Tonsberg, 2007.

19) Albrecht, C. and Klesitz, M., Three-Dimensional Wind Field Calculation Above Orographic Complex Terrain in Southern Europe, European Wind Energy Conference, Athens, 2006.

20) Berge, E., Gravdahl, A. R., Schelling, J., Tallhaug, L. and Undheim, O., Wind in Complex Terrain: A Comparison of WASP and Two CFD-Models,

European Wind Energy Conference, Athens, 2006.

21) Martin, S., Simulation of Wind Profiles with WindSim/Phoenix, WindSim User Meeting, Tonsberg, 2007.

을 실시하였다(3장). 민감도 분석에 의한 예측 성능의 상호비교를 위한 국소배치 소프트웨어로는 WAsP, Meteodyn WT<sup>22)</sup>, WindSim을 선정하였다.

표 1. 예측성능 상호비교를 위한 국소배치 모델

Models	WAsP	Meteodyn WT	WindSim
Analysis Method	Linear theory	CFD	CFD
Turbulence Model	-	1-eqn. model	$k-\epsilon$ model
Adequate Terrain	Rolling Terrain	Complex Terrain	Complex Terrain

## 2. 세종기지 풍환경 분석

### 2.1 측정지점 간 기상상관분석

남극 세종기지가 위치한 킹조지섬(King George Island) 마리안소만(Marian Cove) 일대는 전형적인 복잡지형이나 세종기지 인근 측정지점(그림 1의 MAST)은 해안평지에 위치하고 있다. 해안 평지를 따라 동쪽으로 625m 떨어진 창고동 인근에 또 하나의 측정지점(그림 1의 KIER)이 있으며 그 배후는 급경사 언덕으로 연결되어 있다.

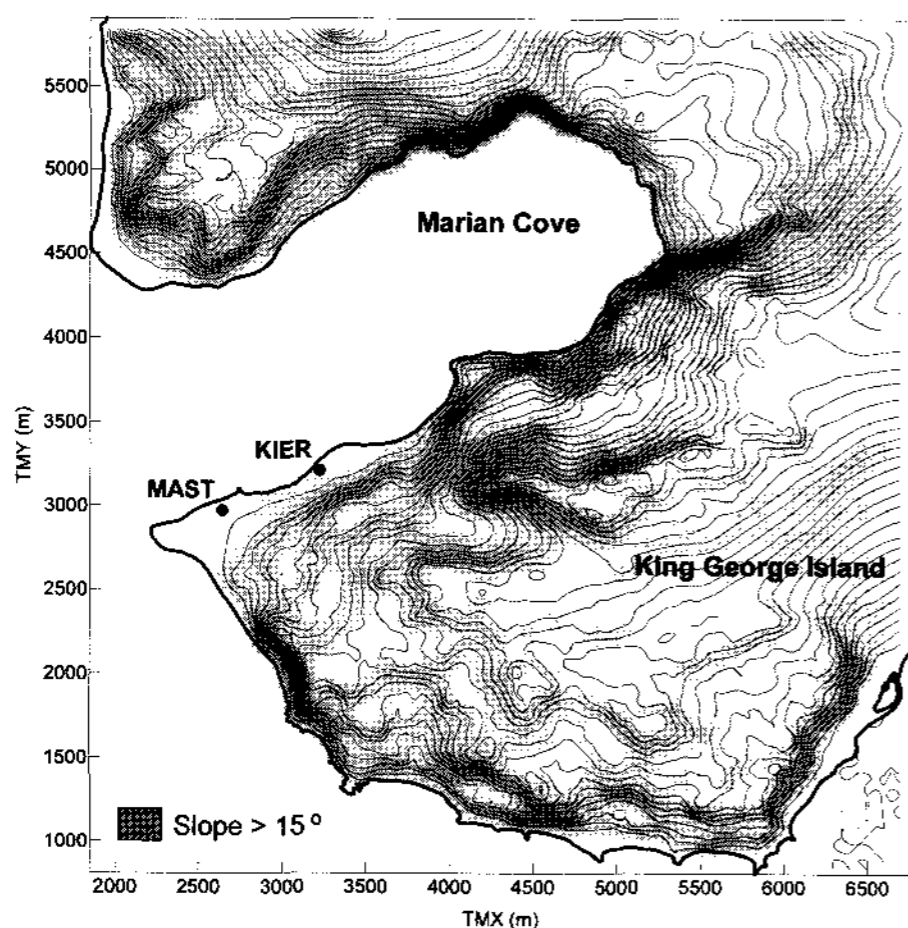


그림 1. 남극 세종기지 일대 등고선지도 및 설계지점

본 연구에서는 이들 두 측정지점의 풍황자료를 국소배치 설계조건으로 사용하여 국소배치 모델의 민감도 분석을 실시하였다. 이를 위한 전제조건은 측정지점의 풍황자료는 국지풍황 대표성이 있는 동기간 기상자료이어야 한다는 것이다. 국소배치를 위한 바람지도 작성 시 모든 측정지점이 포함되도록 해석영역을 선정하기 때문에 해석영역은 동일 풍계권역으로 가정하여 해석된다. 따라서 민감도 분석을 위한 측정지점은 기상학적으로 동일 풍계권역에 위치하는 것이 바람직하다.

세종기지의 경우, MAST와 KIER 측정지점은 비교적 가까이 위치하고 있으며 두 지점 사이의 지형 및 지면거칠기의 변화가 없으므로 민감도 분석 용도에 적합하다고 사료된다. 그러나 기상학적 변동성을 확실하게 배재할 수 있음을 확인하기 위하여 기상상관분석을 실시하였다.

그림 2는 2006년 풍황자료<sup>23)</sup>를 사용한 측정-상관-예측(MCP; Measure-Correlate-Predict) 분석결과 중 풍속의 상관도를 보여주는 그래프로, 접합계수 0.90과 결정계수(R<sup>2</sup>) 0.98의 매우 높은 상관도를 보이고 있다. 참고로 시계열 풍속의 상관계수는 0.97이다. 그림 3은 측정지점 간 풍황 구간별 상관도를 보여주고 있는데 막대그래프는 두 지점 간의 풍향차이다. 북동풍과 남풍계열에서는 지형적 요인으로 인하여 풍향편차(wind directional shift)가 발생함을 알 수 있으며, 이를 통하여 두 지점은 기상학적 상관성이 매우 높은 동일 풍계권임에도 불구하고 상이한 지형적 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 두 지점의 측정자료는 국소배치 소프트웨어가 얼마나 지형효과를 정확하게 해석하는가를 판별하기 위한 자가검증에 활용할 수 있다고 판단된다.

22) Meteodyn, <http://www.meteodyn.com/>

23) 김석우, 김현구, 남극 세종기지 풍환경 분석에 의한 풍력자원평가, 한국태양에너지학회 논문집, 27권, 3호, 2007.



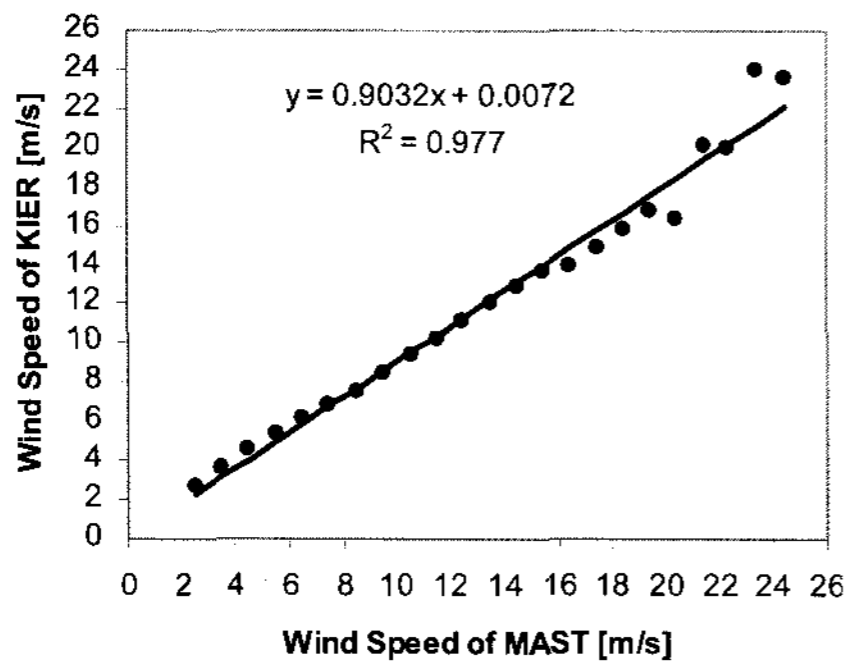


그림 2. 측정지점 간 풍속의 상관도

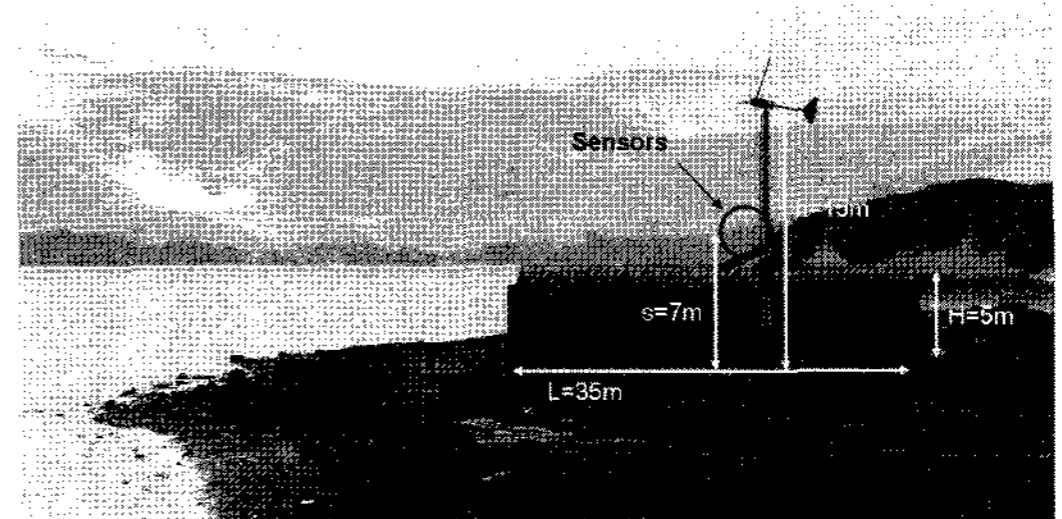


그림 4. 풍력발전기 설치지점(KIER)의 배치상황

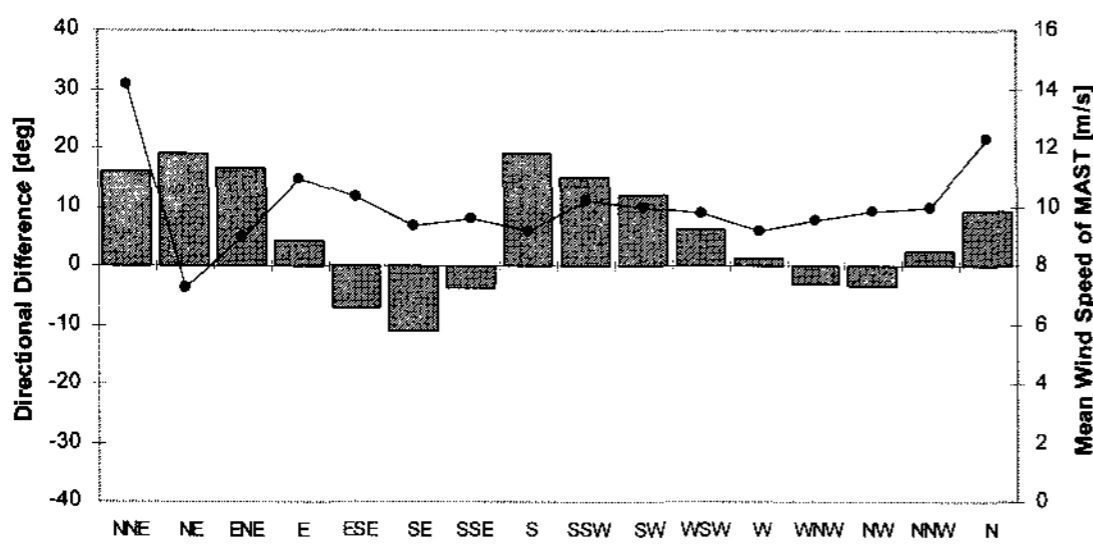


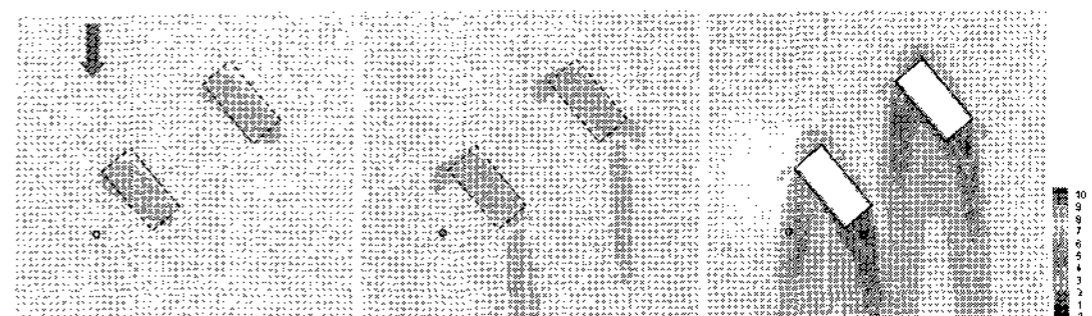
그림 3. 측정지점 간 풍향구간별 상관도(U > 5m/s)

## 2.2 건물간섭효과 전산유동해석

민감도 분석을 위한 측정지점 선정의 전제조건을 고려할 때 풍력발전기가 설치된 KIER 지점 옆의 창고동 건물에 의한 간섭효과를 정확하게 규명할 필요가 있다. 최근에는 공간적 제약 등의 현실적 필요성에 의해 건물 인근에 풍력발전기 또는 기상관측설비 등을 설치하는 경우가 있는데, 이때 건물의 간섭효과에 의한 풍환경 변화를 정확하게 파악하여야 함은 물론이다.

본 연구에서는 그림 4와 같은 돔형 창고동이 20m 떨어져 설치된 풍력발전기 및 기상센서에 미치는 영향을 정성·정량적으로 확인하기 위하여 전산유동해석 프로그램인 Fluent<sup>24)</sup>를 이용하여 해석하였다.

그림 5는 전산유동 해석결과로부터 주풍향인 북풍 사례에 대해 지면, 센서높이, 허브높이에서의 풍속분포도를 비교하여 도시한 것으로, 지면높이에서는 건물에 의한 감속효과가 나타나고 있으나 센서높이인 7m 이상에서는 건물의 간섭효과를 무시할 수 있음을 보여주고 있다. 한편 그림 6은 WAsP의 건물차폐영향(shading analysis) 해석 결과로, KIER 지점에서 북풍인 경우 7m 높이에서 약 5% 정도의 풍속감속을 예상하고 있어 전산유동해석에 비하여 건물의 차폐효과를 과대예측하는 것으로 판단된다. 그 이유로는 WAsP에서는 직사각형 건물에 대해서만 전산유동해석 등의 고차원 해석결과로부터 경험식을 도출하여 차폐영향을 보정하기 때문으로 풀이된다. 참고로 창고동의 배치각도에 의해 기상탑 차폐효과가 가장 큰 풍향은 북북동풍 및 동북동풍이다(그림 6). 그러나 이들 풍향의 출현빈도는 매우 낮은 반면 탁월풍이 북풍이기 때문에 북풍 사례를 대표로 제시하였다.



(a) 15m(허브높이) (b) 7m(센서높이) (c) 2m(지면높이)  
그림 5. 높이별 창고동 주위 풍속분포 (북풍 사례)

24) ANSYS, <http://www.fluent.com/>

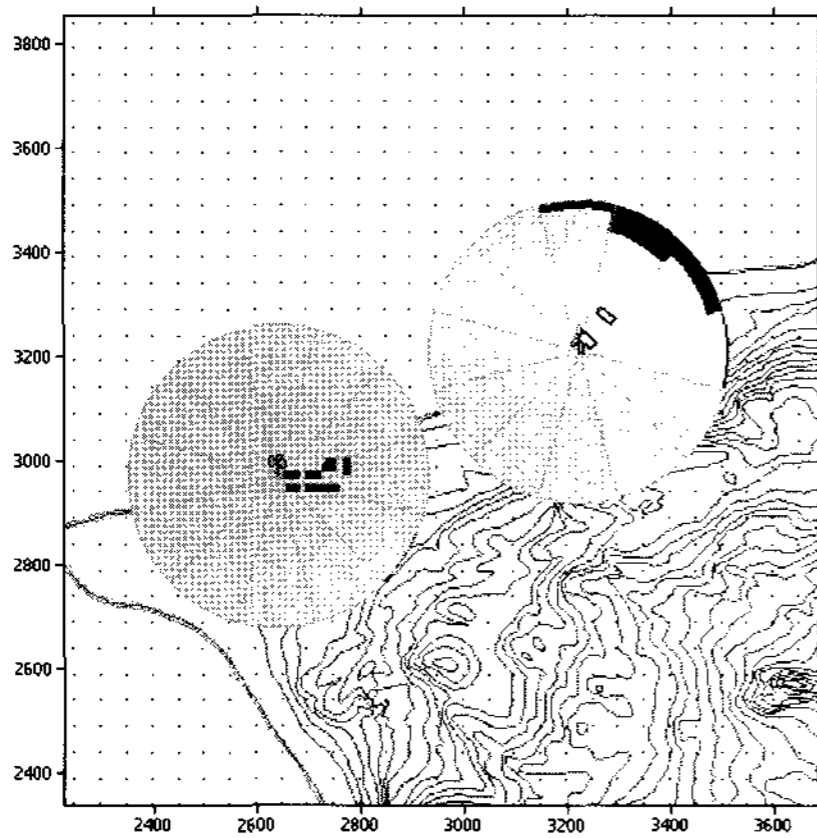


그림 6. 건물간섭효과 장미도 (WAsP)

### 3. 국소배치 민감도 분석

국소배치라 함은 전력생산을 최대화할 수 있도록 풍력발전기의 설치위치를 결정하는 것을 말하며 국소바람지도의 작성이 그 핵심이 된다. 단지개발 대상지역의 국지기상 대표지점에 기상탑을 설치하여 최소 1년간 측정된 풍황자료를 설계조건으로 사용하여 서론에서 설명한 선형이론해석법 또는 전산유동해석법으로 국소바람지도를 작성한다.

복잡지형에서는 측정지점의 국지기상 대표성이 매우 협소한 영역에 국한되기 때문에 단지개발 대상영역 내에 복수개의 기상탑을 설치하여야 한다. 이 경우 본 연구와 같은 자가검증에 의한 국소배치 민감도 분석은 매우 유용한 해석수단이 된다. 그러나 우리나라의 풍력자원조사는 국소배치 결과의 검증에 의한 측정설계를 고려하지 않고 대상지역에 단 하나의 기상탑을 설치한 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구가 국내에서는 최초의 국소배치 민감도 분석이 되며, 복잡지형에서 국소배치 모델선정의 중요성을 실제사례를 통하여 입증한다는 중요한 의미가 있다.

그림 7의 상단은 각각 WAsP, Meteodyn WT, WindSim으로 작성한 국소바람지도이며 설계조건으로 KIER 풍황자료를 사용한 경우이다. 참고로 해석결과의 격자의존성(grid dependency)을

배제하기 위해 지형자료 및 격자계는 동일하게 설정하였다. 하단은 각각의 모델에 대하여 MAST 풍황자료를 설계자료로 사용하여 예측한 풍속분포와 KIER 풍황자료로 예측한 풍속분포의 차이를 도시한 풍속차 분포도이다. 우선 상단의 국소바람 지도를 비교하여 보면 Meteodyn WT의 국소바람지도가 가장 풍속변화를 부드럽게 예측하고 있는 반면 WAsP의 풍속분포도는 지형변화를 매우 민감하게 반영하고 있다. 이는 WAsP가 선형이론 모델인 관계로 지형변화 그대로를 풍속변화로 계산하지만 WindSim 또는 Meteodyn WT와 같은 전산유동해석법은 비선형적 풍속변화를 예측하기 때문에 조금 다른 형태를 보이는 것으로 추측된다. 하단의 풍속오차 분포도는 지점별 풍속예측값 차이의 절대값인 관계로 저풍속 영역인 마리안소만의 내측에서 가장 작은 오차를 보인다. 예상과는 달리 전산유동해석법인 Meteodyn WT의 자가검증에 의한 오차분포가 전반적으로 가장 높은 것으로 나타난 반면 예상대로 WindSim의 풍속오차가 가장 낮은 수준으로 분석되었다.

국소배치 모델 간의 정량적인 비교를 위하여 그림 7의 해석영역 전체에 대해 풍속오차의 RMSE와 최대값을 표 2에 제시하였다. RMSE의 경우 WindSim을 기준으로 Meteodyn WT는 68%, WAsP는 21%나 더 큰 오차를 보였다. Meteodyn WT는 전산유동해석법이면서도 일원방정식 난류모델을 채택하였기 때문에 유동박리를 예측하지 못할 뿐 아니라<sup>25)</sup> 복잡지형에서의 난류유동장 변화를 정확하게 계산하지 못하여 오차가 커진 것으로 판단된다. 참고로 그림 7 하단에 최대오차값과 그 발생위치를 표시하였다. 오차가 적을수록 국소배치 모델의 바람장 예측성능이 우수하다고 판정할 수 있으므로 RMSE 뿐만이 아니라 최대오차도 가장 작은 WindSim이 타 모델에 비하여 예측성능이 가

25) Kim, H. G., Test of WindSim for the Wind Flow with Recirculation, WindSim User Meeting, Tonsberg, 2007.

장 우수하다고 판정할 수 있다.

표 2. 자가검증에 의한 풍속예측 오차비교

	WAsP	Meteodyn WT	WindSim
RMSE Error	0.64 m/s (+21%)	0.89 m/s (+68%)	0.53 m/s (-)
Max. Error	1.45 m/s (+44%)	1.42 m/s (+41%)	1.01 m/s (-)

#### 4. 결 론

남극 세종기지 실제사례를 통하여 현재 풍력자원평가에 널리 사용되는 대표적인 국소배치 소프트웨어인 WAsP, WindSim 그리고 Meteodyn WT를 대상으로 자가검증(auto-validation) 방식에 의해 국소바람지도 작성 시 설계기상자료에 의한 풍속예측의 민감도 분석을 수행하였다.

본 논문의 주요 결론을 정리하면,

- (1) 기상학적 상관성이 매우 높으나 상이한 지형적 영향을 받는 동일 풍계권역 내 측정지점의 풍황자료를 국소배치의 설계기상자료로 사용하고 이로부터 작성된 국소바람지도를 자가검증하는 방법론을 제시하였다. 이 방법에 의하여 복잡지형에서의 풍력발전 단지개발 시 국소배치에 따른 설계오차를 최소화할 수 있는 모델의 선정이 가능하며 또한 자가검증에 의한 불확도를 사업성 평가에 반영할 수 있다.
- (2) 남극 세종기지의 실제사례를 통하여 대표적인 국소배치 모델의 민감도 분석 결과를 비교한 바에 의하면 전산유동해석법과  $k-\epsilon$  난류 모델을 채택한 WindSim의 예측 신뢰도가 가장 우수하며 설계기상자료에 따른 민감도가 가장 낮은 것으로 평가되었다.
- (3) 민감도 분석 시 풍황자료에 지형효과 이외의 영향요인을 배제시키기 위해 건물차폐효과를

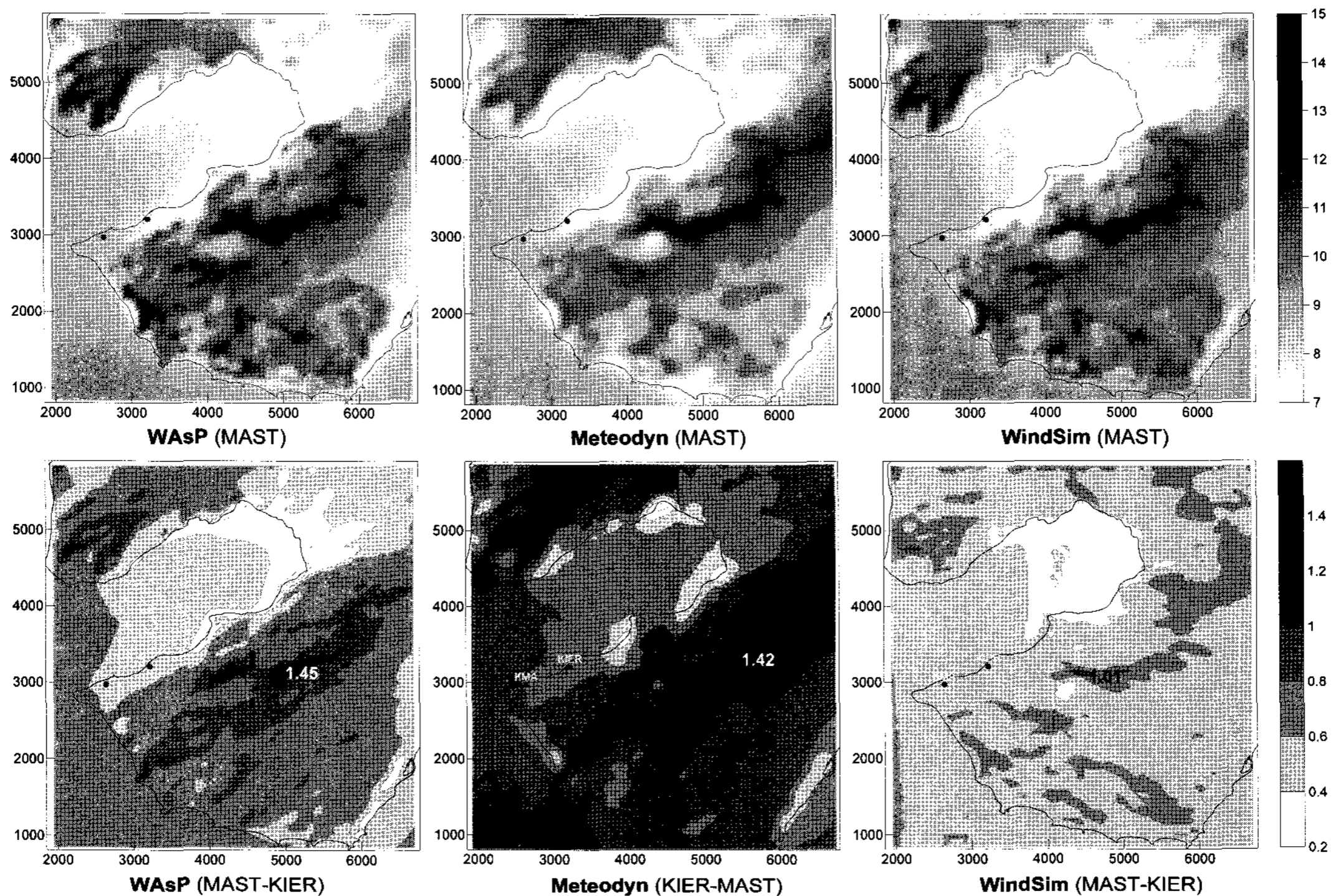


그림 7. 국소배치 모델별 국소바람지도(상단) 및 풍속오차 분포도(하단)



전산유동해석으로 확인하였다. 건물 인근에 기상탑 등의 관측설비 또는 풍력발전기 등이 설치되는 경우에는 반드시 이러한 해석을 통하여 차폐영향도를 정성·정량적으로 파악하여야 할 것이다.

본 논문은 국소배치 중 국소바람지도 작성 시 설계기상자료에 의한 풍속예측의 민감도 분석을 수행하고 예측오차를 정량적으로 비교하였다는 점과 국소배치 소프트웨어의 예측불확도를 측정지점이 아니라 해석영역에 대하여 정량분석하였다는 점에서 기존 연구와 차별된다.

본 논문에서 제시한 국소배치 민감도 분석법은 향후 풍력자원평가 시 매우 중요한 참조사례가 될 것으로 기대되며 동시에 풍력자원조사 시 불확도 평가가 가능하도록 자가검증을 염두에 둔 측정설계가 반드시 필요함을 주장하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 공공기술연구회 연구비 지원으로 수행되었기에 관계기관 및 관계자 여러분께 사의를 표합니다. 또한 세종기지 기상관측자료를 제공하여 주신 극지연구소와 Fluent 해석을 담당한 우수 연구원에게도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김석우, 경남호, 극한환경에서의 소형풍력발전 실증운전, 한국태양에너지학회 논문집, 26권, 4호, pp. 25-30, 2006.
2. 김석우, 김현구, 남극 세종기지의 전산유동해석에 의한 풍력자원평가, 한국태양에너지학회 논문집, 27권, 3호, 2007.
3. 배재성, 장문석, 주영철, 윤정은, 경남호, 남극 세종기지의 풍력자원 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 25권, 3호, pp. 53-60, 2005.
4. Albrecht, C. and Klesitz, M., Three-Dimensional Wind Field Calculation Above Orographic Complex Terrain in Southern Europe, European Wind Energy Conference, Athens, 2006.
5. Berge, E., Gravdahl, A. R., Schelling, J., Tallhaug, L. and Undheim, O., Wind in Complex Terrain: A Comparison of WAsP and Two CFD-Models, European Wind Energy Conference, Athens, 2006.
6. Bowen, A. J. and Mortensen, N. G., WAsP Prediction Errors Due to Site Topography, Risoe National Lab., Risoe-R-995, 2004.
7. Ishihara, T., Yamaguchi, A. and Fujino, Y., A Nonlinear Model for Predictions of Turbulent Flow Over Steep Terrain, World Wind Energy Conference, Berlin, 2002.
8. Jackson, P. S. and Hunt, J. C. R. Turbulent Wind Flow Over a Low Hill, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 101, pp. 929-955, 1975.
9. Kim, H. G., Test of WindSim for the Wind Flow with Recirculation, WindSim User Meeting, Tonsberg, 2007.
10. Llombart, A., Mallet, A., Burillo, N., Alvarez, O., Talayero, A., Influence of Orography on Wind Resource Assessment Programs, European Wind Energy Conference, Milano, 2007.
11. Llombart, A., Talayero, A., Mallet, A., Telmo, E., Performance Analysis of Wind Resource Assessment Programs in Complex Terrain, Int'l Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2006.
12. Martin, S., Simulation of Wind Profiles with WindSim/Phoenics, WindSim User



- Meeting, Tonsberg, 2007.
13. McKay, D. C., Dealing with Uncertainty: Wind Resource Assessment, Environmental Finance Workshop, Toronto, 2005.
  14. Moreno, P., Calbo, J., Pozo, M. and Gravdahl, A. R., Micro-Scale Effects Over the Wind: Modeling Flow Around Buildings with WindSim-Phoenix, European Wind Energy Conference, Athens, 2006.
  15. Steinbach, E., Comparison of Measured Wind Profiles with WindSim Calculations, WindSim User Meeting, Tonsberg, 2007.
  16. Watson, G., Doublas, N., Hall, S., Comparison of Wind Flow Models in Complex Terrain, World Renewable Energy Congress, 2005.
  17. Wood, N., The Onset of Separation in Neutral, Turbulent Flow over Hills, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 76, pp. 137-164, 1995.