

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

남극 세종기지의 전산유동해석에 의한 풍력자원평가

김석우*, 김현구**

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

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

Wind Resource Assessment of the Antarctic King Sejong Station by Computational Flow Analysis

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

*Wind Energy Research Group, Korea Institute of Energy Research

Abstract

In accordance with Madrid and Kyoto Protocols, a 10kW wind turbine installed about 625m away from the King Sejong Station in the Antarctica has been in operation successfully. The current location of the wind turbine has different geographic surroundings from the previous candidate site considered in 2005 and that makes re-evaluation of wind resource at the current site including geographic effects necessary. Especially, strong wind flow derived by steep and complex terrain is dominant in the Antarctica so that computational flow analysis is required. The wind rose measured at the previous and current installation location are identical with strong meteorological correlation but prevailing directions of wind power density are different because of local wind acceleration due to complex terrain. Numerical analysis explains which effects brings this discordance between the two sites, and a design guideline required for additional wind turbine installation has been secured.

Keywords : 세종기지(King Sejong Station), 전산유동해석(CFA: Computational Flow Analysis), 풍력자원(Wind resource)

1. 서 론

남극 세종기지(62°13'S, 58°47'W)는 1988년

에 남극반도와 평행하게 발달한 남셰틀랜드군도(South Shetland Islands) 맥스웰만(Maxwell Bay)의 킹조지섬(King George Island) 연안에

접수일자 : 2007년 5월 31일, 심사완료일자 : 2007년 6월 30일
교신저자 : 김현구(hyungoo@kier.re.kr)

건설되었으며¹⁾ 연구원이 상주하며 다양한 극지연구를 수행해오고 있다.

남극 환경보호를 목적으로 체결된 포괄적인 국제협약인 마드리드 의정서(Madrid Protocol)에 의거하여 현재 대다수 국가의 남극기지에서는 청정에너지원인 풍력발전을 적극적으로 도입, 확대해나가고 있다. 이는 유류수송 선박사고에 의한 해양오염, 저장과정에서의 토양오염, 연소과정에서의 대기오염을 제거하기 위한 노력의 일환이다.

이러한 배경 하에 세종기지에 풍력발전을 도입하고자 한국에너지기술연구원에서는 기상관측탑 인근지역에 대한 국소배치(micrositing)를 실시하였으며,²⁾ 2006년 2월에는 15m 타워에 10kW 급 소형풍력발전기를 설치하고 극한환경에서의 실증운전을 성공적으로 수행함으로써 에너지원으로서의 활용가치를 입증하였다.³⁾

그런데 세종기지 소형풍력발전기의 최종 설치위치는 최초 설계지점인 세종기지 기상관측탑(MAST) 인근 부두 옆으로부터 세종기지에서 해안을 따라 동쪽으로 625m 떨어진 창고동 옆(KIER)으로 변경되었다(그림 1). 극지환경 특성상 풍력발전기 블레이드(blade)에 생성된 결빙이 고속으로 탈빙될 경우, 최초 설계지점에서는 인근의 유류 저장탱크 등 시설물과 작업인력에게 위험요소가 될 수 있다는 판단 하에 설치위치를 변경하게 된 것이다. 따라서 설치위치 변경에 따른 풍력자원 재평가가 필요하게 되었다.⁴⁾

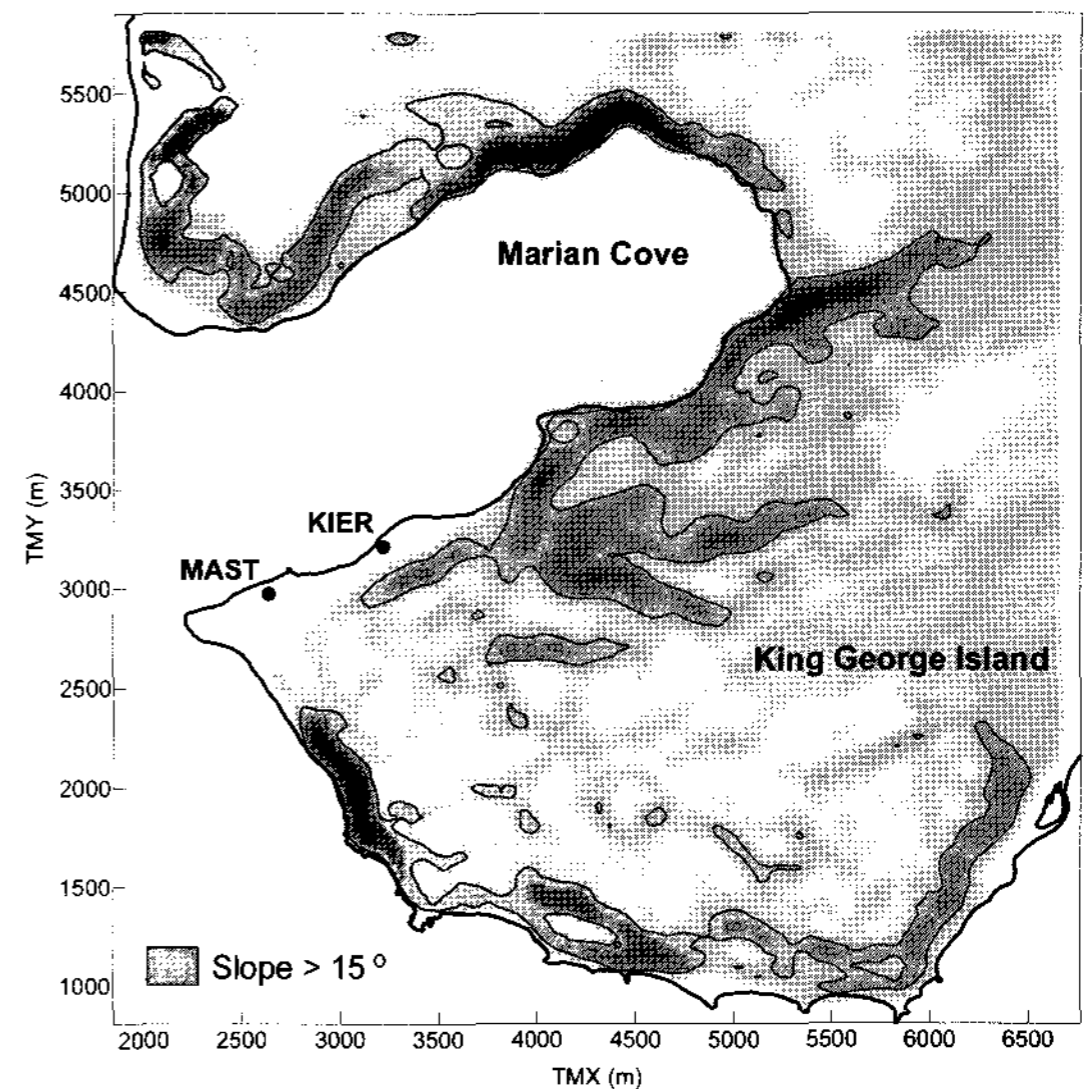


그림 1. 남극 세종기지 일대 지형경사도 및 설계지점

최초 설계지점 선정을 위한 풍력자원 분석은 세종기지 기상관측탑(MAST) 측정자료 및 선형해석법인 WAsP⁵⁾를 이용하여 세종기지 주변 직경 200m 이내 국소영역에 대하여 수행되었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 MAST 일대는 모든 방향으로 열려있는 평탄지형이므로 직경 200m의 영역은 동질영역으로 볼 수 있으며, 실제로 WAsP로 예측한 대상영역 내 4개 설계지점의 연평균풍속은 8.35 ± 0.12 m/s로 지점 간 차이가 미미하게 나타났다. 그러나 변경된 설치위치(KIER)의 남쪽은 급경사면이므로 복잡지형(complex terrain) 효과가 나타날 것으로 예상된다.

일반적으로 지면경사도 12도 이상에서는 비선형적 유동특성에 의해 선형해석법이 유효하지 않으며⁶⁾ 15도 이상이면 유동박리(flow separation)가 발생하게 된다.^{7) 8)} 제주도 송당지역의 실측자

1) <http://www.polar.re.kr/>

2) 배재성, 장문석, 주영철, 윤정은, 경남호, 남극 세종기지의 풍력자원 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 25권, 3호, pp. 53-60, 2005.

3) 김석우, 경남호, 극한환경에서의 소형풍력발전 실증운전, 한국태양에너지학회 논문집, 26권, 4호, pp. 25-30, 2006.

4) 풍력발전기도 중형 100kW(허브높이 23.4m)에서 소형 10kW(허브높이 15m)로 변경되었음.

5) 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 유동방정식을 선형화하여 지형변화에 따른 풍속을 계산하는 이론해석모델, <http://www.wasp.dk/>

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) Wood, N., The Onset of Separation in Neutral,

료를 이용하여 WAsP 예측오차를 평가한 경남호 등(2003)의 연구사례에 의하면 해당지역은 비교적 단순한 지형임에도 불구하고 풍력밀도 예측오차가 23%로 매우 큰 것으로 보고되었다.⁹⁾ 또한 김현구 등(2003)는 복잡지형에서의 풍력자원평가 시 수치기상모의 및 전산유동해석에 의한 풍환경 분석이 필요함을 사례를 통해 밝힌 바 있다.¹⁰⁾

본 논문에서는 남극 세종기지의 풍력발전기 설치지점 및 용량변경에 따른 풍력자원 재평가에 대하여 소개하고자 한다. 특히 경사가 급한 복잡지형에서는 선형해석법의 예측오차가 클 것으로 예상되는 바, 전산유동해석을 수행하여 지형적 요인에 의해 형성되는 풍환경 특성을 정확히 파악함으로써 향후 풍력발전기 추가설치 시 필요한 설계기준을 확보하고자 한다.

2. 세종기지 풍환경 분석

2.1 세종기지 기상환경

남극대륙에는 지표면에 의해 냉각된 공기가 급한 경사면을 따라 흘러내리는 활강바람(katabatic wind)이 특징적이며¹¹⁾ 킹조지섬에도 급경사 복잡지형에 의해 활강바람이 존재한다.

기후학적으로 킹조지섬은 중위도 편서풍대에서

유입되는 온난 해양성 한대기단(maritime polar air mass)과 남극대륙으로부터 내려오는 한랭건조 남극기단(Antarctic air mass) 사이에 남극전선(Antarctic front)이 형성되는 고위도 저압대에 속한다. 따라서 고위도(>65°) 남극대륙과는 달리 세종기지는 빈번한 기압골의 통과로 기상변화가 심하므로¹²⁾ 풍력자원평가 시 국지풍계에 대한 고려가 필히 포함되어야 할 것으로 사료된다.

2.2 세종기지 기상관측

남극 세종기지의 자동기상관측장비는¹³⁾ 10m 관측탑에서 풍향, 풍속 등의 기상요소를 10분 간격으로 측정하고 있다. 자동기상관측장비의 위치를 그림 1에 편의 상 MAST로 표기하였으며 그림 2는 설계변경에 의해 창고동 인근에 설치된 풍력발전기와 주변 전경을 보여주고 있다.

10kW 소형 풍력발전기는 15m 타워 상단에 장착하였으며 성능평가 목적으로 타워 중간부분 7m 높이에 풍향·풍속계를 설치하였다. 그림 2의 전경사진에서도 확인되듯이 최종 설치지점(KIER)은 인근 건물의 영향과 배후 급경사 지형에 의한 바람장 변화가 분명히 있을 것으로 판단된다.

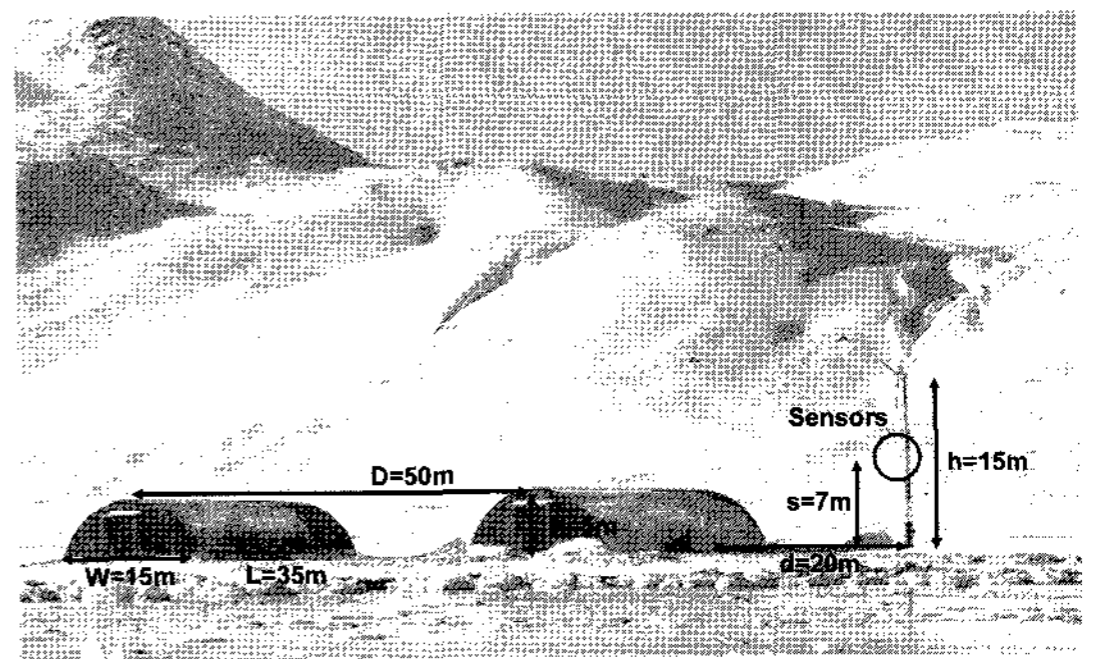


그림 2. 남극 세종기지 소형풍력발전기 설치전경

Turbulent Flow over Hills, Boundary- Layer Meteorol., Vol. 76, pp. 137-164, 1995.

8) Kim, Hyun-Goo and Patel, V. C., Test of Turbulence Models for Wind Flow over Terrain with Separation and Recirculation, Boundary- Layer Meteorol., Vol. 94, pp. 5-21, 2000.

9) 경남호, 윤정은, 허종철, 장동순, 복잡지형에서의 WAsP 예측성 평가, 한국태양에너지학회 논문집, 23권, 1호, pp. 39-47, 2003.

10) 김현구, 최재우, 손정봉, 정우식, 이화운, 풍력발전 단지조성을 위한 바람환경 분석, 한국대기환경학회지, 19권, 6호, pp. 745-756, 2003.

11) Van Lipzig, N. P. M., Turner, J., Colwell, S. R. and Van Der Broeke, M. R., The Near-Surface Wind Field over the Antarctic Continent, Int'l J. Climatology, Vol. 24, pp. 1973-1982, 2004.

12) 이방용, 조희구, 김준, 정연진, 이윤곤, 남극 세종기지에서 최근 태양 복사, 기온과 운량의 변화, 대기, 16권, 4호, pp. 333-342, 2006.

13) 세계기상기구(WMO) 등록번호는 89251이며 1988년 2월부터 관측개시

본 논문에서는 KIER의 관측기간(2006년 2월 27일부터 2006년 12월 14일까지)에 대하여 풍환경 분석 및 풍력자원평가를 실시하였다. 참고로 동기간에 대한 MAST와 KIER 풍향의 상관도를 비교한 그림 3에 의하면 두 지점 간의 풍향 일치도는 매우 높았다.

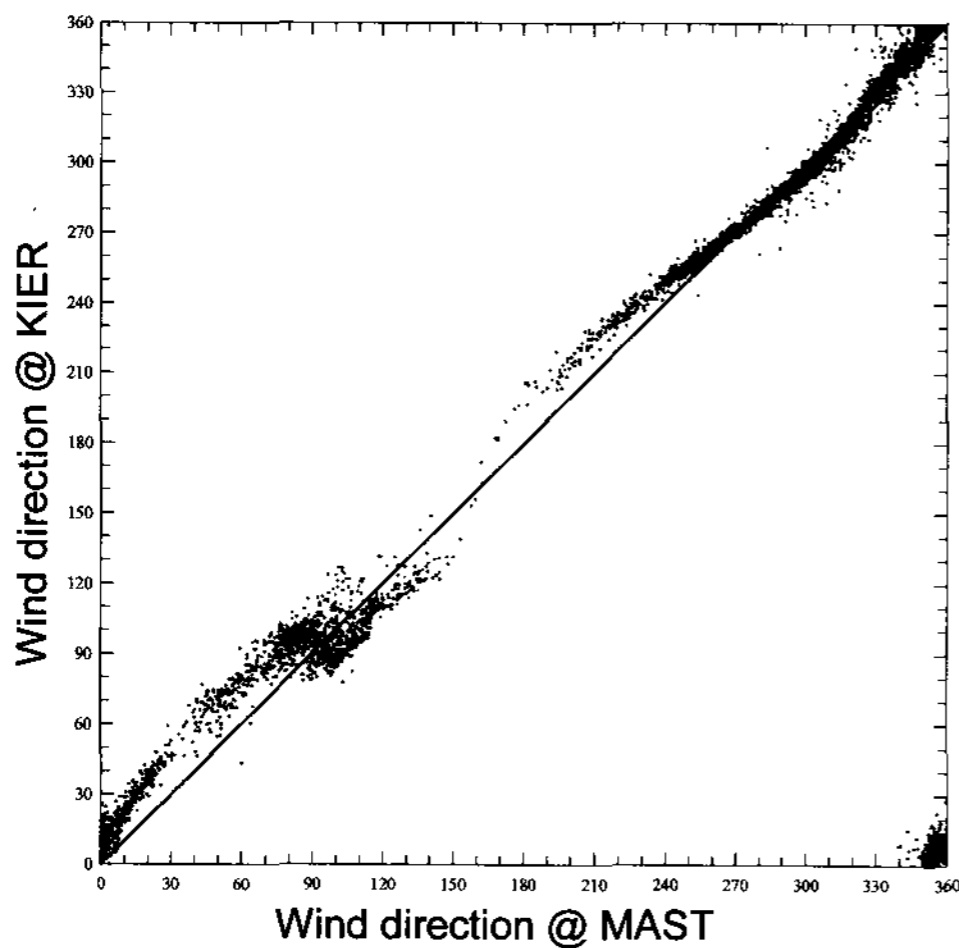


그림 3. MAST와 KIER 지점 간 풍향 상관도

또한 두 지점 간 풍속 상관도를 비교한 표 1에서 확인되듯이 $R^2 = 0.89$ 의 매우 높은 기상학적 상관성을 보이고 있어 이들 두 측정지점은 동일한 풍계권역인 것으로 판정할 수 있다.

표 1. MAST와 KIER 지점 간 풍속 상관도

Direction [deg]	Speed up [-]	R2 [-]	No. of points [-]
0	0.7736	0.9617	953
30	0.8327	0.9855	170
60	1.1317	0.9581	308
90	1.1518	0.9642	726
120	0.9674	0.9586	305
150	0.8255	0.8448	63
180	0.7304	0.9057	51
210	0.9052	0.9679	131
240	0.9556	0.9934	364
270	0.9952	0.9888	608
300	0.8619	0.9749	813
330	0.7832	0.9670	1106
Overall	0.9101	0.8942	5598

2.3 풍환경 전산유동해석

본 연구에서는 복잡지형 내 풍환경 분석을 위하여 전산유동해석 프로그램인 WindSim¹⁴⁾을 사용하였다. 대기유동의 지배방정식인 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식의 유한체적법 수치해석을 위해 격자계의존성(grid dependency)을 확인하여 적정하게 구성된 지표면 격자계(계산영역 $5 \times 5 \text{ km}^2$; 격자수 $140 \times 130 \times 25$)는 그림 4에 도시된 바와 같다. 또한 난류유동장 해석을 위하여 $k-\epsilon$ 난류모델(turbulence model)을 채택하였다. 참고로 대상지역은 연평균풍속 8m/s 이상의 강풍이 일정하게 유지되므로 중립대기를 가정하였다. 그러나 극지 활강바람의 발생원인은 냉각효과이므로 대기안정도의 영향에 대해서는 향후 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

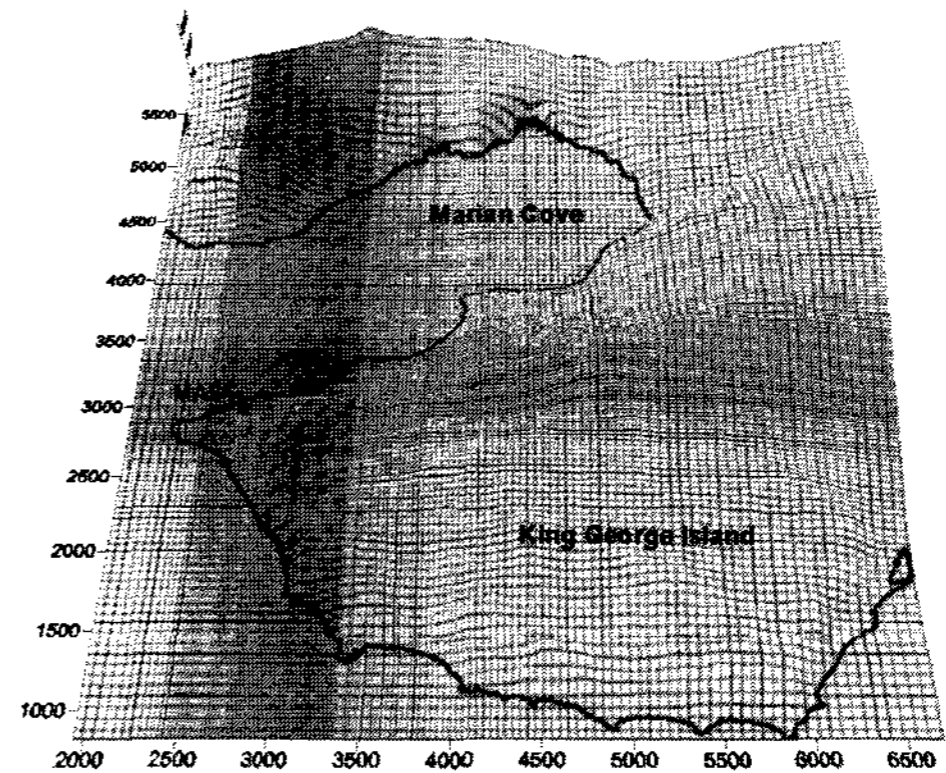


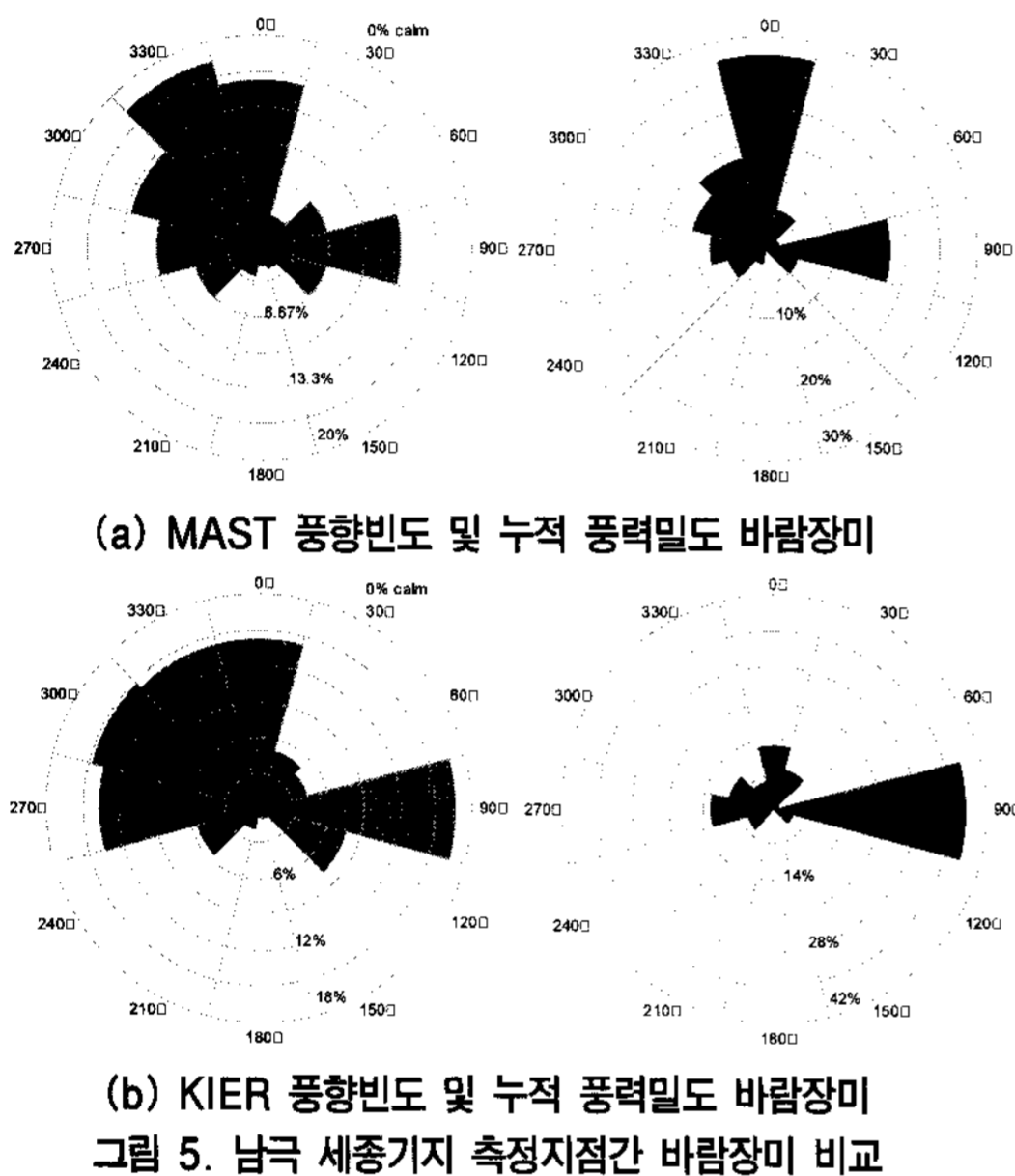
그림 4. 전산유동해석을 위한 3차원 지표면 격자계

3. 세종기지 풍력자원평가

세종기지의 풍력자원을 평가하기 위하여 두 측정지점에서의 풍향빈도 및 누적 풍력밀도(wind power density) 바람장미를 비교하였다. 그림 5를 보면 두 지점 간의 풍향빈도 차이는 최대 $\pm 5\%$ 이내로 거의 동일한 풍향특성을 보이는 반면, 누적 풍력밀도 바람장미를 보면 풍력발전이 이루어

14) <http://www.windsim.com/>

지는 주풍향에 뚜렷한 차이가 있음을 확인할 수 있다. 즉, MAST 지점의 풍력밀도 제 1 주풍향은 북풍, 제 2 주풍향은 동풍인 반면 KIER 지점의 탁월한 풍력밀도 주풍향은 동풍이며 북풍의 풍력밀도의 빈도는 상대적으로 낮게 나타나고 있다.



두 지점의 풍향 출현빈도는 동일하지만 풍력밀도 주풍향이 상이하게 나타난 현상의 원인을 추론해 보면, KIER 지점의 풍속이 MAST 지점에 비해 특히 북풍이 매우 약화되었기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 풍속 변화의 역학적(mechanical) 요인으로 지형지물, 지면거칠기 등을 생각할 수 있으나, KIER와 MAST 지점의 지면거칠기 변화는 거의 없다고 볼 수 있다. 다만 KIER 지점의 관측높이는 지면 7m인데 측근에 20m 떨어져 있는 돔(dome)형 창고동의 높이가 5m이므로(그림 2) 건물에 의한 간섭효과가 다소 있을 것으로 추측된다. 풍력밀도 주풍향 차이의 주요인을 종합적으로 판단해 볼 때 국지지형에 의해 유도되는 풍속의 가감속 효과일 것으로 판단되는데, 이는 특히 급경사 복잡지형에서는 3차원적 풍속의 가감속

효과가 더욱 크게 나타나기 때문이다.¹⁵⁾

북풍사례에서 두 측정지점의 차이를 확인을 위하여 전산유동해석 결과로부터 지군풍이 북풍인 경우의 지면바람장을 그림 6으로 도시하였다. 북풍사례의 평균풍속 분포도 및 유선(streamline)의 궤적을 살펴보면, 세종기지에서부터 북쪽 1.5km에 위치한 급경사 지형으로부터 유입되는 바람은 마리안소만(Marian Cove)를 가로지르며 서쪽으로 치우쳐 수렴됨으로써 결과적으로 MAST 지점의 풍속은 강화시키는 반면 그보다 동쪽에 위치한 KIER 지점의 풍속은 약화 시키게 됨을 확인할 수 있다. 세종기지의 연간 탁월풍인 북서풍의 경우에도 MAST 지점은 지형적 방해요인이 없이 바람이 유입되는 반면 KIER 지점은 마리안소만 건너편의 지형적 차단요인에 의해 풍속이 약화되는 특성을 갖게 된다. 또한 KIER 지점 남쪽은 급경사면으로 차단되어 있어 북풍계열의 풍속을 약화시키는 작용을 하게 된다. 종합하면, 북풍계열의 경우 국지지형에 의한 요인으로 KIER 지점이 MAST 지점에 비하여 풍력자원 손실이 큰 것으로 평가할 수 있다.

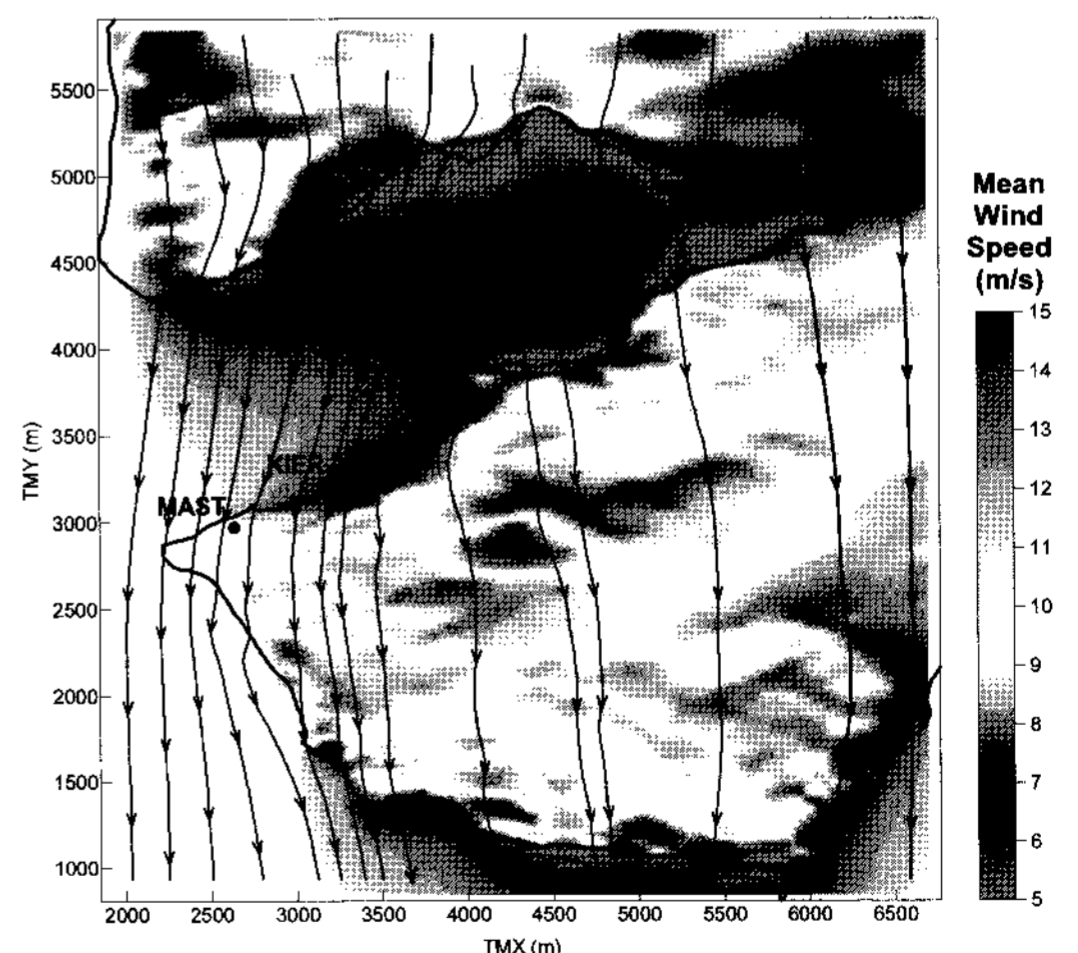


그림 6. 남극 세종기지 일대의 지면바람장 (북풍)

15) Kim, Hyun-Goo, Patel, V. C. and Lee, C. M., Numerical Simulation of Wind Flow over Hilly Terrain, J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn., Vol. 87, pp. 45-60, 2000.

한편 관측기간 전체에 대한 종합적 풍력자원평가를 위하여 작성한 풍속 분포도(또는 바람지도; wind map)는 그림 7과 같다. 풍속 분포도는 30도 간격의 12 풍향에 대해 개별적으로 3차원 바람장을 전산유동해석한 후 설치지점인 KIER에서 관측된 풍향빈도를 가중치로 적용하여 개별결과를 중첩하는 SDD(Statistical Dynamic Downscaling) 방법을 적용하여 작성하였다. 참고로 풍속 분포도의 작성높이는 설치된 10kW 풍력발전기의 허브(hub) 높이인 15m이다.

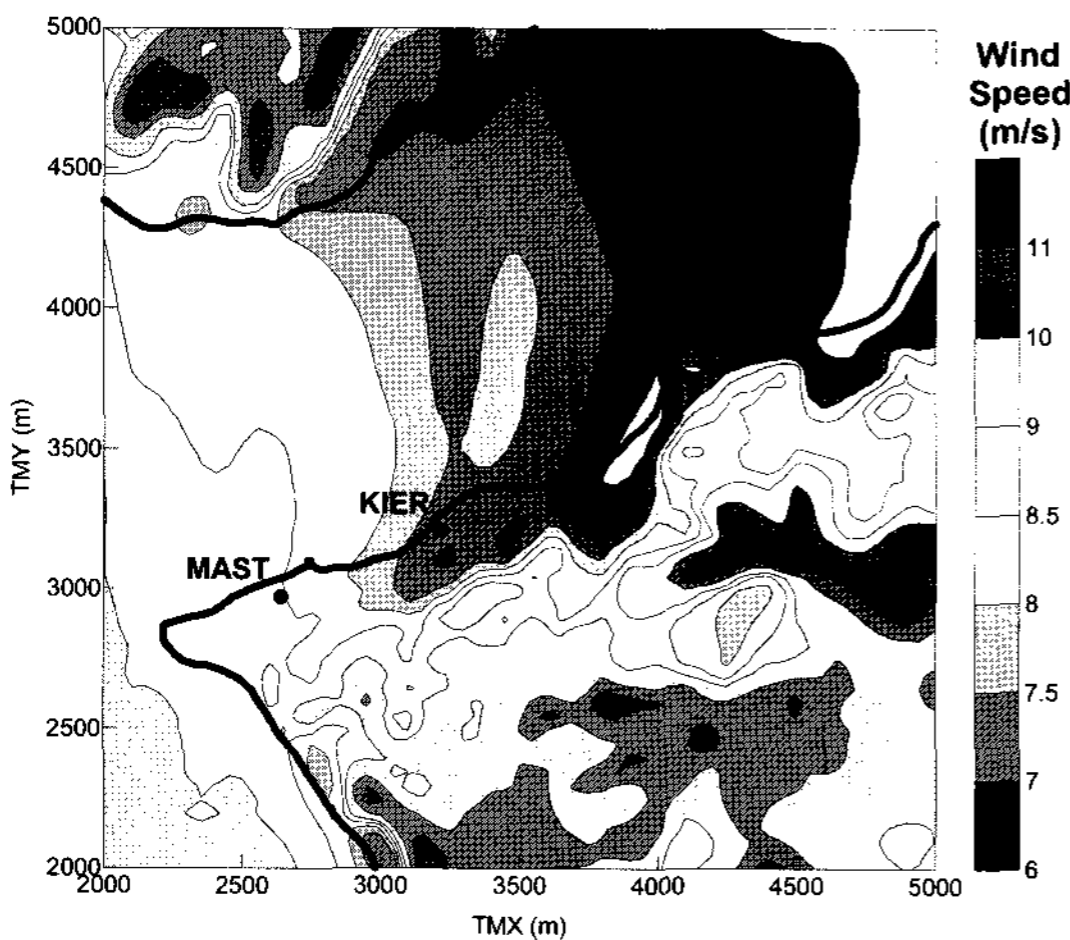


그림 7. 남극 세종기지 일대의 풍속 분포도

측정자료 및 풍속 분포도에 의한 풍력밀도의 계산결과로부터 확인한 바에 의하면, 동풍계열의 풍력밀도는 두 지점 간에 큰 차이가 없었으나 북풍계열은 625m라는 짧은 이격거리에도 불구하고 국지지형에 의한 영향으로 큰 차이가 발생하여 MAST 지점 대비 KIER 지점의 평균풍속은 8.5m/s에서 7.7m/s로 9% 감소되었고 풍력밀도는 720W/m²에서 560W/m²으로 22%가 감소된 것으로 분석되었다. 이러한 차이는 에너지 수급 측면에서 상당한 영향을 미칠 수 있는 수치이지만 풍력발전기와 관련된 안전성 측면에서 현재의 위치에 설치된 것이다.

한편 앞서 검토한 바와 같이 KIER 지점의 남쪽은 배후의 급경사 지형에 의해 북서 탁월풍이 차폐됨에 따라 그림 7에서 확인되듯이 풍속 감속영역이 뚜렷하게 나타나고 있다.

4. 결론

남극 세종기지의 청정에너지원 확보를 위해 도입된 소형 풍력발전기의 설치위치가 안전성을 고려하여 세종기지 인근에서 창고동 인근으로 설계변경됨에 따라 풍력자원 재평가를 실시하였으며, 변경된 설치지점은 최초 설계지점에 비하여 평균풍속은 9%, 풍력밀도는 22% 낮은 수준인 것으로 나타났다.

연안을 따라 불과 625m 떨어져 있으며 풍향 출현빈도 등 기상학적 상관성이 매우 높음에도 불구하고 두 설계지점의 풍력자원이 상이하게 나타나는 원인을 3차원 난류유동장의 전산유동해석을 통하여 규명하였으며, 향후 풍력발전기 추가설치 시 위치선정 지침으로 활용하기 위하여 바람지도를 작성하였다.

현재 풍력발전기는 유지보수 및 전력연계 등의 이유로 돛형 건물 인근에 설치되었기에 건물의 영향이 있으리라 예상된다. 향후 풍력발전기 추가설치 또는 위치변경 시에는 건물구조물에 의한 영향을 전산유동해석으로 정확히 규명하여 풍력밀도 주풍향이 차단되지 않도록 설계하여야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회 연구비 지원으로 수행되었기에 관계기관 및 관계자 여러분께 사의를 표합니다. 또한 세종기지 기상관측자료를 제공하여 주신 극지연구소의 이방용 박사님, 최태진 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 경남호, 윤정은, 허종철, 장동순, 복잡지형에
서의 WAsP 예측성 평가, 한국태양에너지학회
논문집, 23권, 1호, pp. 39-47, 2003.
2. 김석우, 경남호, 극한환경에서의 소형풍력발전
실증운전, 한국태양에너지학회 논문집, 26권, 4
호, pp. 25-30, 2006.
3. 김현구, 최재우, 손정봉, 정우식, 이화운, 풍력
발전 단지조성을 위한 바람환경 분석, 한국대기
환경학회지, 19권, 6호, pp. 745-756, 2003.
4. 배재성, 장문석, 주영철, 윤정은, 경남호, 남극
세종기지의 풍력자원 분석, 한국태양에너지학회
논문집, 25권, 3호, pp. 53-60, 2005.
5. 이방용, 조희구, 김준, 정연진, 이윤곤, 남극
세종기지에서 최근 태양 복사, 기온과 운량의 변
화, 대기, 16권, 4호, pp. 333-342, 2006.
6. Bowen, A .J. and Mortensen, N. G.,
WAsP Prediction Errors Due to Site
Topography, Risoe National Lab.,
Risoe-R-995, 2004.
7. 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.
8. Kim, Hyun-Goo and Patel, V. C., Test of
Turbulence Models for Wind Flow over
Terrain with Separation and Recirculation,
Boundary-Layer Meteorol., Vol. 94, pp.
5-21, 2000.
9. Kim, Hyun-Goo, Patel, V. C. and Lee,
C. M., Numerical Simulation of Wind
Flow over Hilly Terrain, J. Wind Eng. &
Ind. Aerodyn., Vol. 87, pp. 45-60, 2000.
10. Van Lipzig, N. P. M., Turner, J.,
Colwell, S. R. and Van Der Broeke, M.
R., The Near-Surface Wind Field over
the Antarctic Continent, Int'l J.
Climatology, Vol. 24, pp. 1973-1982,
2004.
11. Wood, N., The Onset of Separation in
Neutral, Turbulent Flow over Hills,
Boundary-Layer Meteorol., Vol. 76, pp.
137-164, 1995.