

WAsP과 WindSIM의 풍력자원예측성 평가

Assessment of Wind Resources Predictions using Commercial Codes in Complex Terrains of Korea

이 원 선* 황 윤 석** 백 인 수** 유 능 수***
Lee, Won-Seon Hwang, Yoon-Seok Paek, In-Su Yoo, Neung-Soo

Abstract

Simulations using two well-known commercial codes, WAsP and WindSIM, were performed to predict the wind resources in complex terrains of Korea. The predictions from the codes were compared with the measured data. Cross predictions were performed for two closely located measurement sites. The results from WindSIM were found to be more accurate than those from WAsP. The predictions for wind velocity and direction in five different sites of complex terrain from WAsP and WindSIM were also compared. It was found that if the self prediction of the wind velocity and direction from WAsP is close to the measured wind data, the discrepancies between WAsP results and WindSIM results are also close.

키워드 : 바람자원 평가, WAsP, WindPRO, WindSIM, 복잡지형, 실측데이터

Keywords : Wind Resource Assessment, WAsP, WindPRO, WindSIM, Complex Terrain, Measurement Data

1. 서론

세계는 화석에너지의 고갈과 지구온난화로 인해 친환경적이며 지속가능한 에너지를 개발하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 인류가 가장 오래전부터 이용해왔던 에너지원 중 하나인 풍력은 오랜

기간 동안의 많은 연구와 실증적인 사례를 바탕으로 현재 이러한 조건을 만족시키는 가장 경제적인 에너지원의 하나로 인정받고 있다[1].

풍력발전단지를 조성하기에 앞서 발전단지 인근에서 최소 1년간 풍향 데이터를 측정하여야 한다. 측정된 실측 자료를 바탕으로 인근 풍향자원을 예측하고, 단지 내에서의 최고의 효율을 얻을 수 있는 풍력발전기의 배치 지점을 예측하게 된다. 이런 micro-siting 방법은 풍력발전 단지를 조성하기에 앞서 필수적이며, 이를 위한 연구가 진행되어 오고 있다[2],[3],[4].

현재 국내에서 많이 사용되고 있는 프로그램은 BZ orographic flow model, roughness model,

* 강원대학교 메카트로닉스 공학과 석사과정

** 강원대학교 메카트로닉스 공학과 석사과정

*** 강원대학교 메카트로닉스 공학과 전임강사, 공학박사, 교신저자

*** 강원대학교 메카트로닉스 공학과 교수, 공학박

obstacle model 을 이용하여 한 지점에서의 풍황을 다른 지점으로 외삽하여 예측하게 되는 WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) 과 Reynolds Averaged Navier-Stokes 식을 이용하여 정상상태에서의 3차원 유동장을 해석하는 유한체적 모델인 WindSIM을 들 수 있다.

선형 유동 모델인 BZ 모델을 모체로 하는 WAsP의 경우 그림1에 제시된 바와 같이 갑작스런 지형적 변화를 포함하는 복잡지형에서 일어날 수 있는 유동박리(Flow separation)를 예측하지 못하게 되며 이는 풍속을 예측 하는데 있어 오차의 요인으로 작용할 수 있다고 알려져 있다[4].

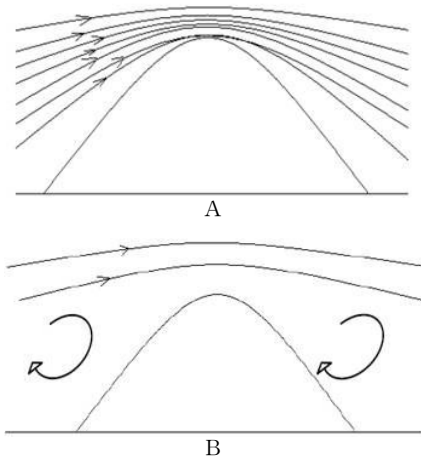


그림 1. A : WAsP 프로그램의 선형해석
B : WindSIM 프로그램의 3차원 유동장 해석

이를 보정하기 위하여 지형의 경사율을 나타내는 척도인 RIX(Ruggedness Index)를 이용하여 실측지점과 예측지점에서의 RIX의 차이에 대한 WAsP 프로그램의 예측 오차를 최소화 하려는 연구가 진행되고 있지만, 국내의 복잡지형의 경우에 대해서는 이에 대한 연구가 이루어지고 있지 않다 [5].

또한 풍황 예측은 지형의 영향을 크게 받기 때문에 우리나라와 같이 산지가 국토의 대부분인 복잡 지형에서 선형모델인 WAsP 프로그램을 적용하는 것은 많은 오차를 발생시킬 것이라는 의견이 대두되고 있지만, 아직 이에 대한 명확한 연구 결과는 없는 실정이다[3],[4],[6]~[10].

따라서 본 연구에서는 WAsP를 Solver 로 이용하는 WindPRO 프로그램을 이용하여 국내 복잡지

형에서 풍황을 예측하여 보고 이를 CFD 프로그램인 WindSIM을 이용한 해석 결과와 비교하여 국내 복잡지형에서의 WAsP 프로그램 적용의 타당성을 검증하고자 한다.

먼저 실측지점이 인접해있는 두 지점에서 각각의 실측데이터를 이용하여 상대 실측지점을 예측해 보는 상호예측을 통해 WindPRO(WAsP Solver)와 WindSIM의 예측성을 비교하고, 예측된 풍속을 실측데이터와 풍향별로 비교하여 두 프로그램에서의 오차율을 검증해 보았다. 그리고 다른 5개 지점에 대하여 실측데이터를 이용하여, 임의의 지점에 대해 WAsP과 WindSIM을 이용하여 풍황을 예측하고, 서로간의 풍속예측오차를 분석하였다.

2. 실측지점 및 실측 데이터

2.1 실측지점

본 논문에서 분석된 지점은 그림 2에 보이는 바와 같이 복잡지형에 위치한 총 7개 지점 (A, A*, B, C, D, E, F)이며, 각 지점에 사용된 전자지도는 실측지점을 중심으로 사방으로 5km 씩 이격된 크기로 설정하였다. 등고선의 간격은 25m 를 이용하였다. 각 지점의 지형적 특성은 다음과 같다.

(1) A-A*지점

A, A*지점은 전체 13.4km x 16.6km로 지도 중심부의 산맥을 따라 각각 40m, 50m 기상관측타워가 세워져 있으며, 두 지점은 약 7.6km 떨어져 있다. 이 지점의 최고 고도는 1550m이며 최저 고도는 375m 이다. 40m 기상관측타워의 실측지점(A)은 1136m, 50m 기상관측타워의 실측지점(A*)은 1150m 의 고도에 위치해 있다.

(2) B 지점

B 지점은 전체 10km x 10km로 최고 고도 1250m, 최저고도 175m로 실측지점은 1100m의 고도로 40m의 기상관측타워로 측정되었다. 실측지점은 산맥의 능선 위에 설치되어 있다.

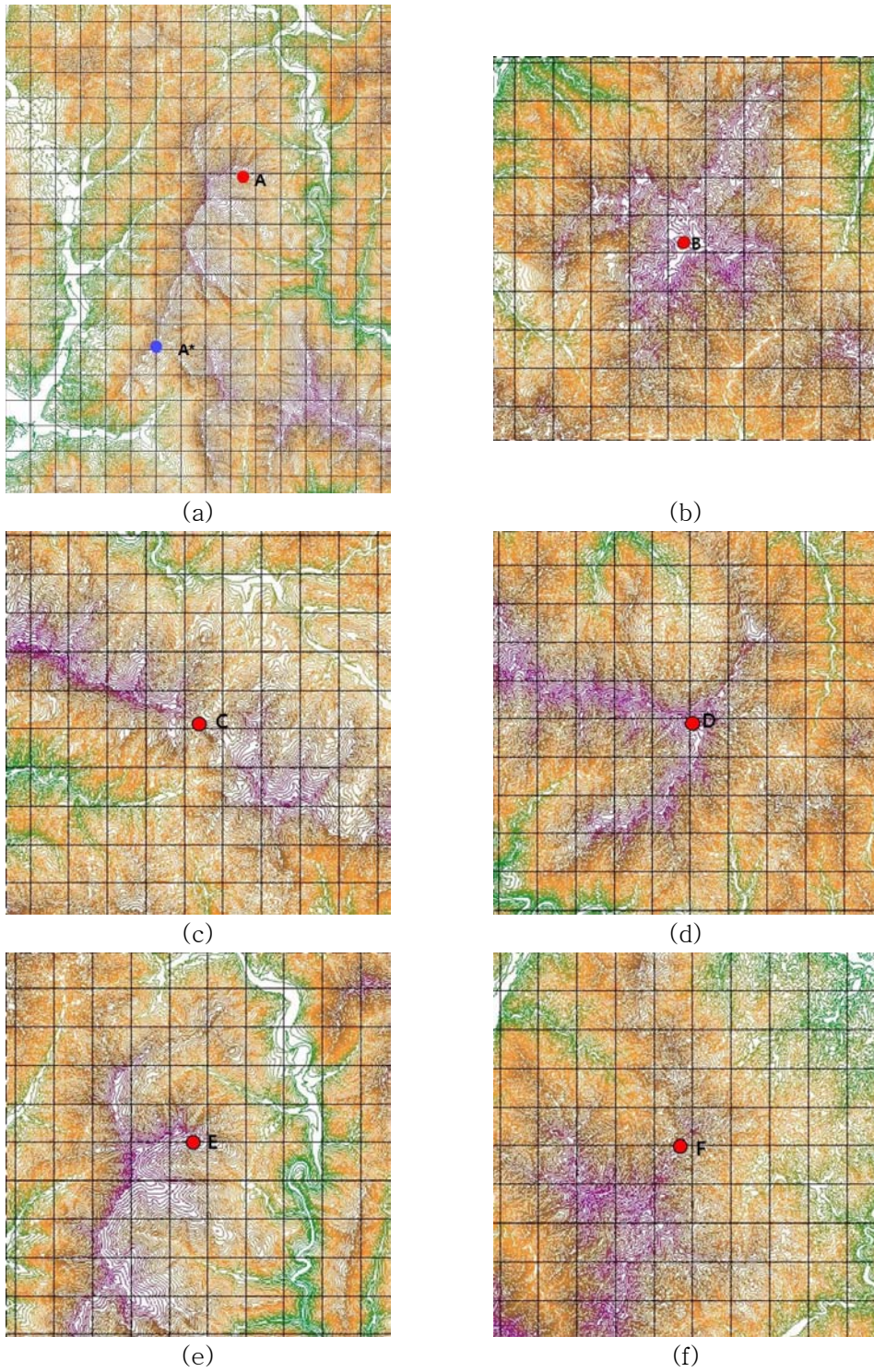


그림 2. 분석지형 7지점

(3) C 지점

C 지점은 전체 10km × 10km로 최고 고도 1475m, 최저 고도 450m로 실측지점은 북서에서 남동으로 뻗어있는 산맥에서 계곡에 해당하는 지역에 설치되었다. 실측지점의 고도는 1100m이며, 실측지점으로부터 약 1km정도 되는 북서쪽으로는 고도 1325m의 봉우리가 있고, 약 500m정도 떨어진 남동쪽으로는 고도 1200m의 봉우리가 있다. 이 지점은 계곡의 영향으로 인해 북서쪽과 남동쪽에서의 바람이 낮게 측정될 수 있다고 예상된다.

(4) D 지점

D 지점은 전체 10km × 10km로 최고 고도 1425m, 최저고도 425m로 되어 있으며, 실측지점은 동서와 북동에서 남서로 가로지르는 산맥이 만나는 지점의 정상에 설치되어 있다. 실측지점의 고도는 1375m이다

(5) E 지점

E 지점은 전체 10km × 10km로 최고 고도는 1350m, 최저 고도는 425m이며, 실측지점은 남북으로 뻗어있는 산맥의 9부 능선이며 실측높이는 1136m이다.

(6) F 지점

F 지점은 전체 10km × 10km로 최고 고도 1175m, 최저 고도 75m이다. 실측지점의 고도는 850m이며 실측지점으로부터 북북동쪽 약 500m 지역에 고도 925m의 봉우리가 있으며, 남남서쪽 약 2km 떨어진 지역에 고도 1150m의 봉우리가 있다. 따라서 이 지점 역시 완만한 계곡에 해당된다.

2.2 실측 데이터

각 지점에서 설치된 기상관측 타워로부터 풍속, 풍향, 온도, 압력을 측정하였다. 40m 기상관측 타워의 경우, 풍속은 40m, 38m, 30m, 20m에서 측정되었으며, 풍향은 40m, 30m에서 측정되었다.

50m기상관측타워의 경우, 풍속은 50m, 40m, 30m, 20m에서 측정되었으며 풍속은 50m, 40m에서 측정되었다. 온도와 압력은 각각 2m 높이에서 측정되었다. 측정된 데이터는 NRG data logger를 통해 10분간 평균되어 10분간 평균풍속, 표준편차, 최대값, 최소값으로 저장된다. 각 지점별 측정기간이 표 1에 정리되어 있다.

표 1. 실측지점 및 측정기간

Site	측정기간
A	6개월 8일
A*	6개월 8일
B	12개월
C	12개월
D	6개월 24일
E	12개월
F	12개월

3. 모델링

WindPRO (WAsP Solver) 에서는 계산되는 전체영역에 장애물이 없다고 가정하고, 지표면에 높이 10m 정도가 되는 잡목림으로 덮여있다고 가정하여 지표거칠기 길이(Roughness Length)를 0.5m로 설정하였다[9].

WindSIM에서는 3차원의 해를 구하는 데 걸리는 계산시간을 단축하기 위해 전체 계산영역의 분해능을 75m×75m로 계산하였으며, 10km x 10km 크기의 지도의 경우 약 36시간 정도가 소요 되었다. 지표 거칠기 및 지형도는 WindPRO 에서 사용한 것과 동일한 것을 사용하였다.

4. 결과

4.1 A-A* 지점

A와 A*지점에서 WindPRO (WAsP Solver)와 WindSIM으로 상호예측을 한 결과가 Table 2에 제시되어 있다. 결과를 보면 실측풍속의 Weibull 평균풍속 5.62 m/s 와 4.13 m/s 에 대하여, WindPRO (WAsP Solver)에서는 각각 8.96 % (A->A*) 와 6.76 % (A*->A)의 오차를 보여주었고, WindSIM 의 경우는 약 0.73 % (A->A*) 와 -3.91 % (A*->A)를 보여주었다.

표 2. WindPRO 와 WindSIM 에서의 상호예측

	Weibull	WindPRO	WindSIM
A→A*	5.62m/s	6 m/s	5.4m/s
Error		8.96%	0.73%
A*→A	4.13m/s	4.5m/s	4.16m/s
Error		6.76%	-3.91%

표 3. A 지점 자기예측오차

	Weibull	WindPRO	Error
A	4.13 m/s	4.2 m/s	1.69 %
A*	5.62 m/s	5.7 m/s	1.42 %

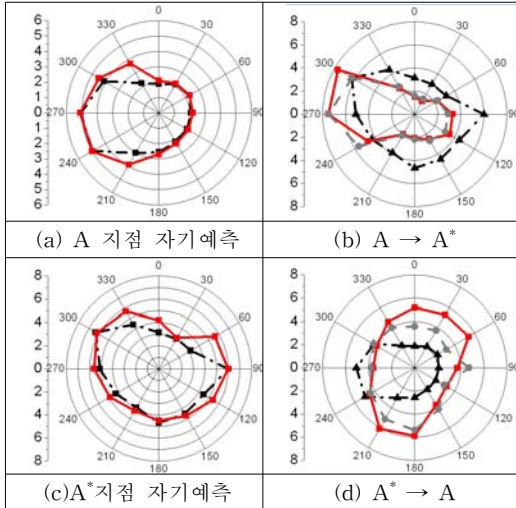


그림 3. A-A*지점에서 풍향별 풍속 예측

-▲- : 실측데이터 -■- : WindPRO
 -●- : WindSIM

그림 3은 각 지점 A, A*에서의 풍향별 풍속을 나타낸다. 그림 3(a)와 3(c)는 WindPRO에서의 실측 데이터를 이용하여 동일지점을 예측하는 자기예측 결과를 실측 데이터와 비교한 것이며, 그림 3(b)와 3(d)는 각 지점의 실측 데이터를 이용하여 나머지 지점을 예측한 상호예측의 결과를 실측 데이터와 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 WindPRO와 WindSIM 모두 실측된 바람장미를 정확히 재현하지는 못하였지만 두 개의 프로그램에서 예측되는 바람장미의 결과는 서로 비슷한 양상을 보였다.

A와 A*지점에서 WindPRO의 자기예측 오차가 표 3에 제시되어 있다. 테이블 예서와 같이 A지점은 1.69%, A*지점은 1.42%의 오차 내에서 자기예측이 되었다.

4.2 그밖의 지점

두 프로그램에서의 예측 특성을 좀더 자세히 비교하기 위하여 B, C, D, E, F 5개 지점에서 실측 지점과 약 1km, 2km, 3km, 떨어진 지점의 능선부에서의 풍속을 예측하고, 각각의 결과를 비교하여 표 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이, 두 프로그램의 풍속 예측차이는 대부분의 경우 10% 이내로 예측이 되었으며, C 지점과 F 지점의 경우에 있어서 10% 보다 높은 풍속예측 차이를 보여주었다. 특히 F 지점의 경우에는 차이가 약 37%로 가장 큰 차이를 보여주었다.

표 4. 지점별 예측 풍속

	구분	1km	2km	3km
B	WindPRO[m/s]	5.2	5.4	5.0
	WindSIM[m/s]	5.41	5.61	5.37
	Difference[%]	3.88	3.74	6.89
C	WindPRO[m/s]	8.8	10.1	10.0
	WindSIM[m/s]	9.00	9.44	10.68
	Difference[%]	2.22	6.99	6.37
D	WindPRO[m/s]	7.2	7.3	6.6
	WindSIM[m/s]	7.03	7.52	7.31
	Difference[%]	2.42	2.93	9.71
E	WindPRO[m/s]	5.0	5.3	5.8
	WindSIM[m/s]	4.80	4.84	5.71
	Difference[%]	4.17	9.50	1.58
F	WindPRO[m/s]	6.9	7.6	9.8
	WindSIM[m/s]	6.14	6.66	7.13
	Difference[%]	12.38	14.11	37.45

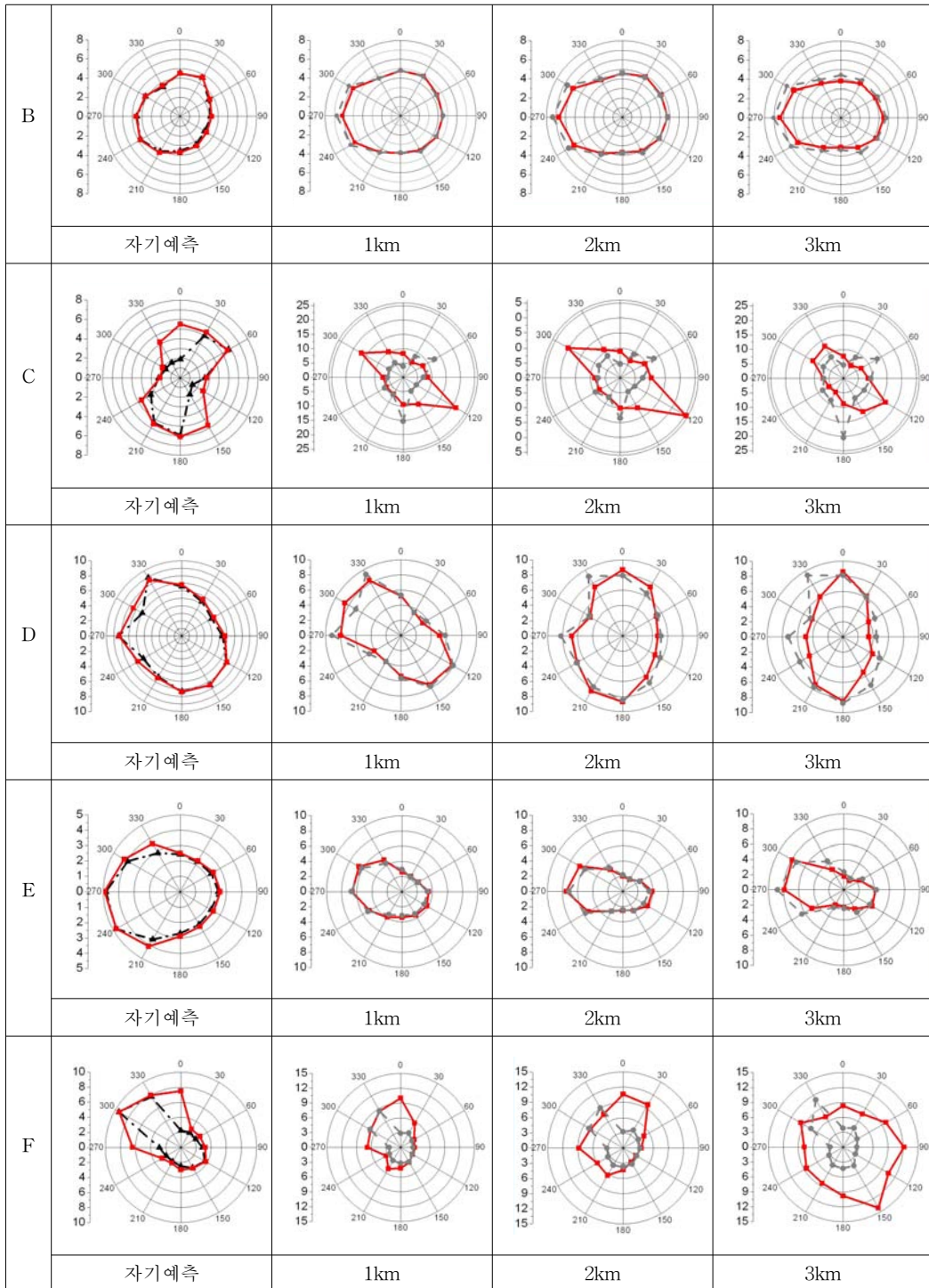


그림 4. 각 지점에서의 바람장미

▲--- : 실측데이터 ■ : WindPRO ● : WindSIM

각 지점에 대한 바람장미가 그림 4에 제시되어 있다. 각 지점에 대한 WindPRO의 자기 예측 경우와, 표 4에 제시된 실측지점에서 1km, 2km, 3km 떨어진 능선지점에서 비교한 WindPRO와 WindSIM의 바람장미 결과가 나타나 있다.

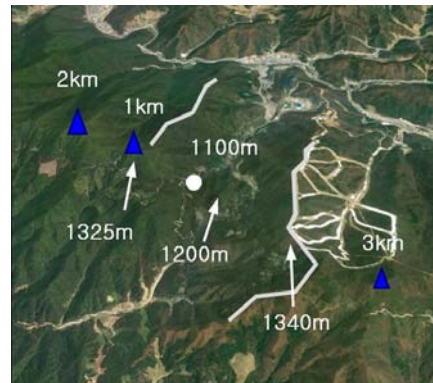
그림에서 알 수 있듯이 B, D, E 지점의 경우 두 프로그램 모두 측정된 풍속과 유사하게 자기예측이 되었으며 실측지점으로부터 1km, 2km, 3km 떨어진 지점에서도 유사하게 바람이 예측되었다.

C와 F 지점에서는 WindPRO의 자기예측의 경우 바람장미가 실측데이터와 다소 차이를 보였으며, 이 경우 실측지점이 아닌 다른 지점에서도 WindSIM의 풍향별 풍속 데이터와 차이를 보여주었다.

앞서 설명되었듯이 C 지점의 지형은 북서방향으로 약 800m 되는 지점에 실측고도 보다 약 225m 높은 봉우리가 있으며 이 봉우리에서 북북동쪽으로 약 3km정도 작은 산맥이 형성되어 270도 ~ 30도 방향의 바람을 막고 있다. 남서 방향으로는 실측지점에서 500m 떨어진 지점에 100m 높은 1200m고도의 작은 봉우리가 있으며 약 1.7km 떨어진 지점에는 240m 높은 봉우리가 있어 약 30도 ~ 160도 영역의 바람이 영향을 받을 것으로 보인다. 따라서 WindPRO를 통해 자기예측을 했을 때, 이 방향에서 풍속값이 크게 보정이 되었으며 산맥의 능선을 따라 발전기를 배치했을 때, 북서와 남동 방향의 풍속이 높게 예측된 것으로 판단된다.

F 지점의 지형은 북동쪽과 남서 방향으로 뻗어 있는 능선에 실측지점이 위치해 있다. 남서방향으로 약 2km 정도 지점에 실측고도 850m 보다 약 275m 높은 봉우리가 있으며 실측지점에서부터 완만하게 경사가 높아지다가 정상부분에서 약 100m 정도 고도가 급격하게 상승한다. 이 산맥의 봉우리에서 북서쪽과 남동쪽으로 산맥이 형성되어 있어 남서풍에 영향을 줄 것으로 보인다. 실측지점의 북서쪽으로는 약 500m되는 지점에 실측지점보다 100m 높은 봉우리가 있으며 산맥 또한 북쪽으로 향하면서 서쪽으로 계곡이 발달하여 있으며 이 산맥은 북풍과 북동풍에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 실측지점에서의 자기예측이 북쪽과 서쪽에서 크게 예측이 된 것으로 예상된다. C와 F 지점의 위성사진을 그림 5에 나타내었다.

따라서 C지점과 F 지점의 경우와 같이 실측지점에 대한 자기예측의 바람장미 결과가 실측데이터와 차이가 날 경우 다른 지점에 대한 예측에 있어



C



F

그림 5. C, F 지점 위성사진

○ : 실측지점 ▲ : 풍향예측지점

서도 WindSIM의 예측 결과와 상이한 결과를 보여주게 될 것으로 판단된다. 이는 표 6에서도 풍향을 무시한 평균 풍속에서의 오차가 가장 큰 두 지점이 C 지점과 F 지점인 것과 연관성을 갖고 있다고 판단된다.

따라서, 만일 복잡지형에서 측정된 데이터를 이용하여 WindPRO로 인근 지역에 대한 풍황을 예측하게 되는 경우, 먼저 자기예측을 통해 실측 데이터의 바람장미와 유사한 결과를 얻는 경우에 있어서는 인근 지역에 대한 풍황 예측도 WindSIM결과와 비교하여 풍속 면에서 약 10% 이내의 오차를 갖게 될 것으로 추측된다. 하지만 보다 정확한 결론을 이끌어 내기 위해서는 보다 많은 복잡지형에서의 두 프로그램의 예측 분석이 필요하다고 판단되며 WindPRO의 예측이 WindSIM의 예측과 많은 차이를 보이는 지형에 대해 보다 면밀히 지형적 특성을 조사한다면 오차의 원인을 보다

정확히 알아낼 수 있을 것이라고 판단된다.

5. 결론

선형예측을 하는 WindPRO(WAsP Solver)와 3차원 유동장을 해석하는 WindSIM으로 복잡지형에서의 풍황예측을 비교해 보았다.

실측지점이 가까운 두 지점에서 각각의 프로그램으로 상호예측을 하여 두 프로그램에서의 풍황예측의 정확성을 확인하고자 하였으며 이를 통하여 5개 지점에서 예측된 풍속을 비교해 예측된 풍속의 차이를 확인하였다.

연구 결과로 상호예측을 수행한 지점에서 WindPRO(WAsP Solver)의 경우 실측풍속과 9% 이내의 오차를 보였으며 WindSIM의 경우 약 4% 이내의 오차를 보였다. 5개 지점 중 실측지점의 주변 지형에 바람의 유동을 방해하는 장애물이나 봉우리가 없는 3개 지점에서는 WindPRO와 WindSIM을 이용하여 예측된 풍속이 서로 10%이내의 차이를 보였으며 풍향별로도 서로 비슷한 예측성을 보여주었다.

실측지점의 주변에 바람의 유동을 방해하는 지형이 있을 경우, 두 프로그램에서 예측된 풍향별 풍속은 큰 차이를 보였다.

참 고 문 헌

[1] 배재성, 장문석, 주영철, 윤정은, 경남호, “남극 세종기지의 풍력자원 분석”, *한국태양에너지학회 논문집*, 25권, 3호, pp. 53-60, 2005.

[2] Russell G. Derickson, Michael Mcdiarmid, Brad C. Cochran, Jon A. Peterka, “Resolving difficult issues of wind power micro-siting in complex terrain”, *AWEA Global WINDPOWER 2004 Conference*, Chicago, Illinois, 2004.

[3] 경남호, 윤정은, 허종철, 장동순, “복잡지형에서의 WAsP 예측성 평가”, *한국태양에너지학회 논문집*, 23권, 1호, pp. 39-47, 2003.

[4] 김석우, 김현구, “남극 세종기지에서의 풍력자원 국소배치 민감도 분석”, *한국태양에너지학회 논문집*, 27권, 4호, pp. 1-9, 2007.

[5] 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 허종철, “복잡지형에서의 WAsP 예측성 향상 연구”, *한국태양에너지학회 논문집*, 23권, 4호, pp. 21-27, 2003.

[6] Anthony J. Bowen, Niels G. Mortensen,

“WAsP prediction errors due to Site orography”, *Riso National Laboratory*, Roskilde, Denmark, December 2004 .

[7] 윤광용, 유능수, 백인수, “복잡지형에 대한 WAsP의 풍속 예측성 평가”, *한국풍력에너지학회 추계학술대회 논문집*, 2008.

[8] Niels G. Mortensen, Anthony J. Bowen, Ioannis Antoniou, “Improving WAsP Predictions in (TOO) Complex Terrain”, *European Wind Energy Association*, March, 2006.

[9] 변수환, 고경남, 허종철, “행원 풍력발전단지의 WAsP 적용 및 평가”, *한국태양에너지학회 논문집*, 24권, 3호, pp. 1-7, 2004.

[10] Niels G. Mortensen, Anthony J. Bowen, Joannis Antoniou, “Improving WAsP Predictions in (Too)Complex Terrain”, *Wind Energy Department, Riso National Laboratory, Mechanical Engineering Department University of Canterbury Christchurch, New Zealand*, 2007.