

복잡지형 형상에 따른 풍력자원 보정에 관한 연구

정의현*, 문채주**, 김의선***, 장영학****

*목포대학교 대학원 전기공학과(swat9310@paran.com), **목포대학교 전기공학과(cjmoon@mokpo.ac.kr),
신경대학교 인터넷정보통신학과(eskim@sgu.ac.kr), *목포대학교 제어시스템공학과(yhchang@mokpo.ac.kr)

A study on wind source interpolation based on shape of complex topography

Cheang, Eui-Heang* Moon Chae-Joo** Kim, Eui-Sun*** Chang, Young-Hak****

*Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(swat9310@paran.com),

**Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(cjmoon@mokpo.ac.kr),

***Dept. of Information & communication Engineering, Shin Gyeong University(eskim@sgu.ac.kr),

****Dept. of Control System Engineering, Mokpo National University(yhchang@mokpo.ac.kr)

Abstract

There has been a continuous increase in the utilization and utility value of renewable energy such as wind power generation in modern society. Wind condition is the absolute variable to the energy volume in the case of a wind power generation system. For this reason, wind power generators have already been installed in areas where wind velocity is high and the possibility of danger is very low. In other words, instability is likely if the wind velocity in an area is high and where a wind power generation system can be built. On the contrary, low wind velocity is possible in an area with high stability. Therefore, the design and manufacture of a wind power generation system should be carried out in a more complicated topography in order to secure a bigger market. This study examines and suggest how topography affects wind shear by analyzing the measured data in order to predict wind power generation more reliably.

Keywords : 복잡지형(complex topography), 윈드시어(Wind shear), 풍력단지설계(Wind farm design), 풍황계측시스템(Met mast), 풍황(Wind condition), 풍력터빈(Wind turbine)

1. 서론

기후문제로 인해 기존 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지인 풍력, 태양광, 바이오

등의 에너지가 각광받고 있으며, 그 중에서도 풍력발전은 장소마다 다소차이가 있지만 바람의 운동에너지의 약 40%가 전기로변환이 가능하며 설비비용이 기타 신재생에너지 중

투고일자 : 2009년 10월 13일, 심사일자 : 2009년 10월 18일, 게재확정일자 : 2009년 12월 17일
교신저자 : 문채주(cjmoon@mokpo.ac.kr)

가장 적은 것으로 경제성이 양호하다. 또한, 블레이드, 발전기, 요잉 베어링, 기어 등의 고부가가치 기술을 국내기업이 확보하면 현재보다 설치단가도 충분히 낮아질 것으로 예상된다.¹⁾

풍력자원이 우수한 유럽지역에서는 2008년도 기준 유럽전지역 약 30GW 풍력발전 설비용량을 갖추었으며, 2018년에는 약 130GW의 설비용량으로 증가될 것으로 예상된다.²⁾

국내에서는 많은 기업들이 풍력발전 시스템을 제작 및 개발하고 있으며, 지방단체의 해상풍력단지개발 프로젝트에 관한 관심도가 높아지고 있다.

또한 정부에서는 2030년 세계풍력시장 주도국 진입을 목표로 보급사업 및 부품R&D분야의 국책사업을 다양하게 지원하고 있다.²⁾

풍력에너지는 공기의 밀도에 비례하고, 풍속의 세제곱근에 비례하므로 풍속이 풍력발전량에 절대적인 변수이다. 때문에 장시간 풍력계측을 수행하고 풍력에너지가 우수한 장소를 선별하여 풍력발전단지가 건설되어야 한다.^{3),4),5),6)}

국내지형을 고려하여 풍력계측기는 지형과 지면의 상태 및 타워의 높이를 고려하여 튜브형과 래티스형 자립형으로 구분하여 설치하고 있다. 이중 튜브형 타워는 2m원통형 기둥을 조립한 뒤 세워야 하므로 최소 한쪽 방향에서 met mast의 높이만큼 평탄한 지역에만 설치해야 하는 단점이 존재함에도 가격이 저렴한 이유로 국내에서 가장 많이 설치되고 있다.

국내의 풍력계측 기준은 일반화 되어 있지 않으나, 풍력발전기 선정 및 풍력발전기 제조회사에서 안정성과 원활한 유지관리를 위해서 IEC61400의 국제기준에 적합한 지형인지 판단을 요구한다. 하지만 IEC61400의 국제기준도 유럽에서 설치된 풍력발전기를 대상으로 규정한 것이기 때문에 국내에서 많이 설치된 강원도, 경북산간지역과 제주도내륙과 같은 복잡지형(Complex topography)에

대한 국내외 기준의 규정이 필요하다.^{3),4)}

또한 국내에서 주로 설치된 Met mast는 풍력이 우수할 것으로 예상되는 강원, 경북 산간지역의 산간지역에 주로 설치되었다. 산간지역의 경우 산 정상에 Met mast pole설치가 어려우므로 Met mast에서 계측된 풍력이 왜곡될 수 있는 지형에 설치하는 경우가 가끔 발생했다.

Met mast에서 5km이내에 풍력이 왜곡될 만한 지형이 존재하는 경우 해당방위의 풍력이 특정 높이 혹은 전체의 풍력이 계측되지 못하므로 인한 근거리 유동박리의 예상 및 풍력발전기 Hub높이 보정에 치명적인 오류를 범하게 된다.

본 연구에서는 지형의 형상별로 높이별 풍속과 윈드시어를 분석함으로써, 지형에 따른 Met mast 설치 여건과 예상의 신뢰도를 높이는 방안을 제시하고자한다.

2. 풍력에너지 이론 및 고찰

물체의 운동에너지는 물체의 질량과 속도의 제곱에 비례하고, 공기의 질량은 공기의 밀도와 풍속이므로 풍력에너지밀도는 수식 [1]과 같다.

$$P = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad \text{수식 [1]}$$

여기서, P : 공기의 운동에너지[W]

m : 질량[kg]

V : 공기의 속도(풍속)[m/s]

ρ : 공기밀도

대용량 풍력발전기의 hub 높이는 60m~120m이고, 블레이드 한 날개의 크기는 45m~60m이다. 즉, 블레이드는 지면에서부터 30m~150m높이의 풍속에 영향을 받기 때문에 항상 높이 보정 풍속이 요구된다. 풍속은 높이에 따라 수식2와 같은 멱 법칙을 적용한다.^{3),6)}

$$V_H = V_L \left(\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{H}{z_0}} \right) m/s \quad \text{수식 [2]}$$

여기서, H : 높은 고도[m]
 L : 낮은 고도[m]
 V_H : 높은 고도에서 풍속[m/s]
 V_L : 낮은 고도에서 풍속[m/s]
 Z_0 : 조도계수
 Z : 임계계수
 α : 윈드시어

동일한 장소와 시간에 측정된 풍황데이터의 조도계수는 동일하므로 서로 다른 높이에서 측정된 풍속과 수식 3을 유추할 수 있다.

$$V_H = V_L \left(\frac{H}{L} \right)^\alpha m/s \quad \text{수식 [3]}$$

여기서, 윈드시어(wind shear)를 얻기 위해서 대수법칙을 이용하면 수식 4와 같다.

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{V_h}{V_l} \right)}{\ln \left(\frac{h}{l} \right)} \quad \text{수식 [4]}$$

3. 풍황과 지형의 특성

3.1 방위별 풍력자원

풍황자원 계측을 위한 센서는 NRG사의 모델을 사용하였으며, 설치높이는 표 1에 나타났다.

표 1. 계측센서 제원

	A지역 설치높이[m]
풍속센서	80,70,60,50,40
풍향센서	80,70,60,50,40
기압계	2
온도계	2

본 연구에서 사용된 풍황계측 로거는 NRG사에서 제작된 모델¹⁾로써, Sampling 주기는 1/3Hz이며, 측정된 data를 10분에 1회씩 평균 값, 표준편차 값, 최대값, 최소값을 계측한 5월~7월까지 약 3개월 동안 측정된 data를 분석하였다.

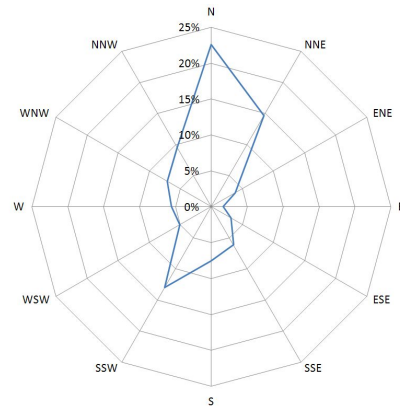


그림 1. A지역 80m높이의 방위별 풍속빈도

선정지역의 풍향별 빈도는 그림 1과 같다. 북풍이 23%로 빈도가 가장 많고, 동풍이 2%로 가장 낮다. 2%의 빈도를 나타낸 동풍은 10분 평균으로 170개의 데이터가 수거 되었으며, 80m 고도에서 0~11.7m/s까지 고르게 분포하였다.

3.2 조사지형의 특성

Met mast설치지역은 육지(본토)에서 약 30km 떨어진 도서 지역으로 주변 5km이내의 돌섬²⁾을 제외하고 바다로 이루어져있다.³⁾ 선정 지역의 면적은 0.92km²이고 최고 해발고도는 62m이다.

Met mast설치는 설치여건에 의하여 이보다 약 8m 낮은 53m 고도에 설치하였다.

지형분석을 위하여 국토지리 정보원에서

1) 풍력발전기 제작규정인 IEC61400-1에서는 풍속 Sampling은 1/3Hz로 난류강도등급 및 극한풍속등급을 규정하고 있다.
 2) 이름 없는 암초 지상에서 약 2.5m 정도 솟아있는 돌부리를 말한다.
 3) 바다의 파고, 염분, 배의 이동, 해수면 온도등의 경우 지면 조도에 의하여 풍속에 영향을 미치는 영향이 적으므로 바다의 지면조도는 무시한다.

제공하는 Bessel 1:2500자료를 이용하여 Met mast를 기준으로 12방위로 구분하고 각 방위별 이격 지점마다 Gamin사의 위성GPS를 활용하여 해발고도를 측정한 뒤 검토하였다.

Met mast와 50m이격 거리별 경사도를 표 2에 나타내었다.

표 2. 선정지역의 이격 거리별 해발고도(단위 : m)

방위	50M	100M	150M	200m	250m	300m
N	33	13	0	0	0	0
NNE	30	18	0	0	0	0
ENE	42	23	2	0	0	0
E	49	25	13	0	0	0
ESE	51	39	30	3	0	0
SSE	58	51	41	34	28	15
S	60	60	43	25	10	0
SSW	58	47	28	24	26	22
WSW	54	45	40	50	50	50
W	49	50	50	60	34	4
WNW	40	32	27	26	10	0
NNW	34	18	10	1	0	0

경사면이 균일하다고 가정하면, Met mast에서 12방위(30°)로 지형의 형상을 구분하고 지형의 형상에 따라 그림 2와 같이 크게 5가지 형상으로 구분하였다.

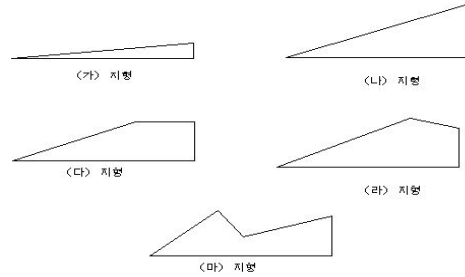


그림 2. 지형의 형태에 따른 분류

(가) 지형은 Met mast의 경사도가 비교적 완만한 지형이고, (나) 지형은 급경사지역, (다) 지형은 급경사후 Met mast근처 50m는 완만한 지형, (라)지형은 Met mast의 고도보다 높은 고도가 존재하는 지형, (마)지형은 중간에 계곡과 같이 좁은 골이 형성된 지형이다. 표 3은 지형의 형태에 따라 분류한 방위 목록이다.

표 3. 지형형상에 따라 분류된 지형

(가)지형	서북서(WNW)
(나)지형	북(N), 북북동(NNE), 동북동(ENE), 북북서(NNW)
(다)지형	동(E), 동남동(ESE)
(라)지형	남남동(SSE), 남(S), 서(W)
(마)지형	남남서(SSW), 서남서(WSW)

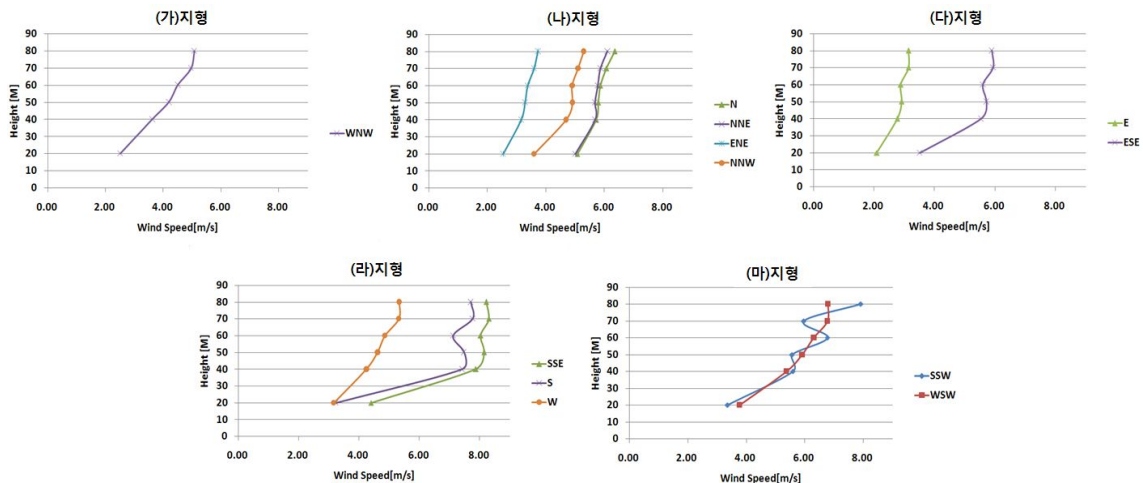


그림 3. 지형형상별로 구분한 높이별 풍속

수식 3에서 언급된 바와 같이 높이에 따른 풍속의 할증은 지수함수이다. (가)지형과 (나)지형은 경사각으로 인하여 발생된 와류가 40m~50m높이에서 풍속할증의 정도가 높게 관측되었으며, 경사각이 낮음에 따라 풍속이 할증되는 구간이 높은 것으로 관측되었다. (다)지형과 (라)지형은 경사각으로 인하여 발생된 와류에 의해 풍속할증의 정도가 70m와 30m 높이에서 발생하였으며, (마)지형과 같은 형태는 70m와 30m의 풍속할증이 비슷한 수준으로 발생한 반면, (라)지형에서는 Met mast보다 얼마나 높은 고도가 존재하는지에 의하여 30m높이에서 할증의 정도가 다르게 관측되었다.

즉, 지형에 의한 공기 유동의 변화에 의하여 특정높이에서 풍력에너지 밀집지역이 발생한다.

4. 결과 비교 분석

표 4. (가) 지형의 80m 보정 풍속 및 오차율

V _H [m]	V _L [m]	WNW	
		보정풍속[m/s]	오차율(%)
80	80	5.08	-
70	60	5.57	8.83
	50	5.22	2.71
	40	5.26	3.49
60	20	5.01	1.34
	50	4.70	8.09
	40	5.00	1.52
50	20	4.79	5.96
	40	5.67	10.57
40	20	5.10	0.49
40	20	4.80	5.63

대상기간동안 선정지역에서 수거된 80m높이의 평균풍속은 6.7m/s이다. 형상이 미치는 Wind shear를 분석하기 위하여 12방위별로 수식 4를 이용하여 측정 높이별 윈드시어를 산출하고, 윈드시어와 수식 3을 이용하여 80m높이의 풍속으로 보정한 결과를 표4에서 표 8에 나타내었다.

(가) 지형은 40m높이 구간에서 풍속할증이 증가하므로 보정높이의 풍속을 예상함

에 이구간의 풍속을 활용 할 경우 오차율이 1.5%~10.6%로 타 구간에서 측정된 자료로 예상할 경우 보다 높다.

(나) 지형은 경사각 큰 구간으로써, 풍력에너지가 밀집하는 구간이 주로 40m~50m 높이에서 발생하므로 60m 높이에서 측정된 자원과 50m, 40m높이에서 측정된 풍속자원으로 예측할 경우 오차율의 평균이 10%, 5%로써 높게 나타났다.

(다) 지형에서 측정된 자원은 60m 높이에서 측정된 자원과 50m, 40m, 20m 높이에서 측정된 자원으로 예측할 경우 오차율의 평균이 21%, 10%, 7%로 경사도이후 평면으로 20m~60m높이는 Wake 영향권이라고 추정된다.

표 5. (나) 지형의 80m 보정 풍속 및 오차율

V _H [m]	V _L [m]	N		NNE		ENE		NNW	
		보정 풍속	오차율 (%)	보정 풍속	오차율 (%)	보정 풍속	오차율 (%)	보정 풍속	오차율 (%)
80	80	6.35	-	6.11	-	3.74	-	5.30	-
70	60	6.50	2.39	6.10	0.07	4.06	7.89	5.69	6.90
	50	6.35	0.03	5.94	2.91	3.73	0.28	5.40	1.91
	40	6.43	1.20	5.98	2.13	3.82	2.28	5.48	3.35
	20	6.42	1.18	6.01	1.55	3.64	2.71	5.42	2.25
60	50	5.95	6.76	5.71	6.90	3.21	16.36	4.76	11.15
	40	6.11	3.98	5.80	5.35	3.48	7.37	5.07	4.50
	20	6.19	2.60	5.95	2.70	3.38	10.47	5.19	2.09
50	40	6.24	1.78	5.84	4.50	3.89	4.01	5.59	5.18
	20	6.34	0.21	6.13	0.39	3.64	2.72	5.68	6.70
40	20	6.43	1.29	6.43	5.03	3.57	4.71	5.88	9.96

표 6. (다) 지형의 80m 보정 풍속 및 오차율

V _H [m]	V _L [m]	E		ESE	
		보정풍속	오차율	보정풍속	오차율
80	80	3.14	-	5.90	-
70	60	3.70	15.14	6.83	13.72
	50	3.23	2.72	6.19	4.69
	40	3.34	5.82	6.17	4.52
	20	3.19	1.55	5.95	0.94
60	50	2.50	25.73	5.03	17.20
	40	2.85	10.10	5.37	9.84
	20	2.86	9.73	5.61	5.16
50	40	3.53	10.90	6.10	3.37
	20	3.34	5.87	6.63	11.12
40	20	3.32	5.35	7.65	22.96

(라) 지형의 경우 이격 거리가 멀수록 낮은 높이의 왜곡이 없고, 이격 거리가 가깝고 근거리의 경사각이 클수록 낮은 높이에서 관측된 풍속을 이용한 예측 오차가 크다.

표 7. (라) 지형의 80m 보정 풍속 및 오차율

V _H [m]	V _L [m]	S		W		SSE	
		보정 풍속 (%)	오차율 (%)	보정 풍속 (%)	오차율 (%)	보정 풍속 (%)	오차율 (%)
80	80	7.71	-	5.34	-	8.22	-
70	60	8.43	8.59	5.09	12.45	8.80	6.65
	50	7.82	1.51	5.48	6.74	8.43	2.32
	40	7.98	3.43	5.91	7.50	8.52	3.55
	20	8.11	4.96	5.68	5.05	8.71	5.59
60	50	6.45	19.56	8.04	6.38	7.65	7.44
	40	7.03	9.56	7.83	1.32	8.08	1.75
	20	8.23	6.39	7.42	2.06	9.01	8.74
50	40	8.06	4.36	6.63	6.12	8.90	7.67
	20	10.82	28.76	7.00	3.12	10.78	23.73
40	20	15.12	49.04	7.95	2.32	13.28	38.12

(마) 지형은 계곡이 계측기에서 좌우로 이루어진 지형으로 불규칙적인 wake가 발생하는 지형이다.
70m 높이에서 관측된 풍속을 이용한 예측오차율의 평균이 형상에 관계없이 7%이내이다.

표 8. (마) 지형의 80m 보정 풍속 및 오차율

V _H [m]	V _L [m]	SSW		WSW	
		보정풍속	오차율(%)	보정풍속	오차율(%)
80	80	7.92	-	6.79	-
70	60	5.09	55.43	7.44	8.65
	50	5.48	44.38	7.26	6.45
	40	5.91	34.06	7.44	8.63
	20	5.68	39.27	7.42	8.46
60	50	8.04	1.48	6.90	1.48
	40	7.83	1.06	7.24	6.18
	20	7.42	6.65	7.31	7.02
50	40	6.63	19.46	7.67	11.42
	20	7.00	13.02	7.61	10.76
40	20	7.95	0.45	7.59	10.53

지형의 형상에 따라 풍력에너지 밀집지역이 서로 다른 형태로 존재하고, 풍력에너지

밀집지역을 이용하한 예측오차가 최대55.4%로 나타났다.

표 9 전체 방위별 80m보정풍속 및 오차율

VH[m]	VL[m]	80m이상풍속[m/s]	오차율[%]
80	80	6.7	-
70	60	6.51	3.12
	50	6.48	3.70
	40	6.46	3.90
	20	6.67	0.70
60	50	6.95	3.41
	40	6.75	0.52
	20	7.14	5.96
50	40	6.95	3.35
	20	7.70	12.81
40	20	9.63	30.24

5. 결 론

지형의 형상이 높이별 풍속에 미치는 영향에 대해서 조사한 결과는 다음과 같다.

- (1) 70m 높이에서 관측된 풍속을 이용한 경우 예측오차율이 매우 높다.
- (2) 모든 지형에서 풍력에너지밀집 고도가 존재하고 풍력에너지 밀집지역에서 높이보정을 수행할 경우 오차가 많이 따른다. 때문에 지형의 형상 및 경사도에 맞게 Met mast의 위치와 pole의 높이를 설정하여야 한다.
- (3) 풍력단지개발을 위하여 Met mast를 설치할 경우 풍력발전기 Hub 높이로 설치하는 것이 가장 이상적이라 할 수 있다. 지형의 형상 분류를 통하여 그림 2의 (가)(나)와 같은 지형으로 이루어진 경우 경사도가 낮을수록 경사각으로 인한 다양한 유동박리 현상이 발생하므로 Met mast가 높아야 한다.
- (4) 그림 2의 (라)지형에서는 최대한 높은 Met mast 설치가 요구되며, 계측 센서의 높이를 최대한 높게 설치하여야한다.
- (6) 그림 2의 (마)지형은 40m~60m의 높이에 풍력에너지 밀집지역이 불특정하게

존재하므로 다수의 Met mast를 설치하여 유동박리해석이 필요하다.

14. 주린원, 탄소배출권 거래제도와 산림경영에의 시사점

참 고 문 헌

1. 산업자원부, 신·재생에너지 발전차액지원제도 개선 및 RPS제도와 연계방안 최종보고서, 2006. 03
2. 에너지관리공단 신·재생에너지센터 & 산업자원부, 신·재생에너지 RD&D 전략 2030, 2008.1, pp.237
3. 경남호 외 4명, 복잡지형에서의 WAsP 예측성 향상연구, 한국태양에너지학회 논문집 제23권 제 4호, 2003. 12, pp. 21~27
4. 문채주 외 4명, 우리나라 지형특성을 고려한 풍력발전 타당성 연구, 한국태양에너지학회 논문집 제28권 제6호, 2008. 12, pp. 24 ~ 32
5. 경남호 외 3명, 한반도해역의 해상풍력자원평가, 한국태양에너지학회 논문집 제23권 제2호, 2003. 6, pp. 35 ~ 41
6. 정의현, 풍력발전단지 설계를 위한 지형과 바람자원 분포특성에 관한연구, 목포대학교 석사학위논문
7. 조강표 외 3명, 풍동실험을 이용한 3-D 산악지형의 경사도에 따른 풍속할증, 한국풍공학회 학술대회 제10호, 2007. 5, pp. 49 ~ 55
8. 조강표 외 2명, 독립된 3차원 산악지형의 풍속할증에 대한 풍동실험 및 고찰, 2008. 1, pp. 3 ~ 10
9. 에너지기술연구원, 새만금 지구내 풍력발전단지 건설 타당성 조사 연구용역, 1997. 11
10. 목포대학교, 전남지역 풍황, 2008. 12
11. 에너지기술연구원, 강원지역 풍력단지 설계, 2006. 07
12. Niels - Erik Clausen, [Offshore wind Energy Technology], RisØ offshore wind energy technical course, 2009
13. Stern's [IPCC Report], 2007.02