

서해상과 연안지역의 풍력기상자원 비교평가

김대영 · 정형세 · 김연희* · 김백조

국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2017년 10월 11일, 수정일: 2017년 12월 6일, 게재확정일: 2017년 12월 13일)

Comparative Assessment of Wind Resources Between West Offshore and Onshore Regions in Korea

Dae-Young Kim, Hyeong-Se Jeong, Yeon-Hee Kim*, and Baek-Jo Kim

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 11 October 2017; revised 6 December 2017; accepted 13 December 2017)

Abstract Characteristics of wind resources of offshore and coastal regions were compared using wind data obtained from HeMOSU-1 (Herald of Meteorological and Oceanographic Special Unit-1) meteorological mast located at Southwestern Sea, and ground-based LiDAR (Light Detection And Ranging) at Gochang observation site near it. The analysis includes comparison of basic wind statistics such as mean wind speed, wind direction, power law exponent and their temporal variability as well as site assessment items for the wind power plant such as turbulence intensity and wind power density at the two observation sites. It was found that the wind at HeMOSU-1 site has lower diurnal and seasonal variability than that at Gochang site, which lead to smaller turbulence intensity. Overall, the results of the comparative analysis show that the wind resource at HeMOSU-1 site located offshore has more favorable condition for wind power generation than the wind resource at Gochang which shows nature of coastal area.

Key words: Wind resources, Wind power density, HeMOSU-1 (offshore) site, Gochang (onshore) site

1. 서 론

2015년 12월 개최된 제21차 UN 기후변화협약 당사국 총회에서는 195개국인 신 기후체제의 근간이 될 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였다. 파리협정은 탄소감축을 통하여 지구온난화를 억제하는 내용이며, 5년 주기로 각 나라의 탄소감축 현황 및 지구온난화 수준을 점검하고 이를 줄이기 위한 노력을 점차적으로 강화하는 규정이다. 이에 따라 세계적으로 화석에너지 기반의 인프라에 대한 교체수요가 발생하고 있으며 신 재생에너지를 활용한 대체 전력시스템의 요구가 점차

커지고 있는 시점이다. 최근 시작된 서남해 해상풍력 개발 사업은 서남해 지역(전북 부안과 고창 앞바다)에서 3단계(실증/시범/확산단지)로 나누어 최종적으로 2.5 GW 규모 해상풍력발전단지를 구축하는 사업이다(MOTIE, 2015). 풍력발전단지 부지선정을 위한 사업성 평가 시, 개발 대상지역에서 취득된 바람자료를 바탕으로 바람환경(이하 풍황, Wind Environment) 분석, 발전량 예측 및 경제성 분석이 수행된다. 국제 전기 기술 위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)에서는 이러한 관측자료 분석에 있어, 관측 기간이 최소한 1년 이상인 바람자료를 활용할 것을 권장하고 있다(IEC, 2005). 이에 따라 한국전력공사는 해상풍력발전단지 예정지에 해상 기상탑 HeMOSU-1 (Herald of Meteorological and Oceanographic Special Unit-1, 이하 해모수)를 설치하여 2010년부터 서남해 지역의 풍황자료를 수집하고 있다. 해상 풍황관측은

*Corresponding Author: Yeonhee Kim, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6784, Fax: +82-64-738-6515
E-mail: yeonheckim@korea.kr

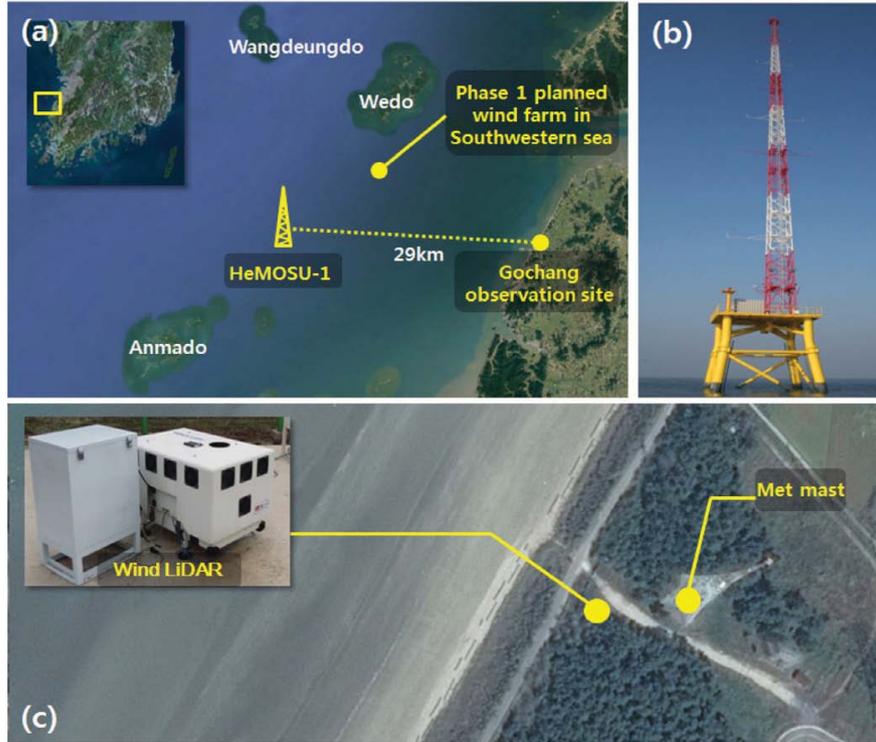


Fig. 1. Maps for (a) area of analysis, (b) detailed view of HeMOSU-1, and (c) Gochang observation sites.

많은 시간과 설치비용 그리고 위험성이 따르기 때문에, 국내의 경우 해상에서 취득된 바람자료는 거의 없는 실정이다. 반면, 국외에서는 유럽을 중심으로 해상 환경에서 풍력발전과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다.

Barthelmie (1999)는 모닌-오브코브 길이(Monin-Obukhov length)를 이용하여 덴마크 Vindeby의 해상 풍력발전단지과 인근 해안의 대기안정도 비교 연구를 수행하였고, 운영 중인 해상풍력발전단지의 후류로 인한 출력성능 저하를 분석하였다(Barthelmie et al., 2007, 2010).

국내의 경우 해모수의 관측자료를 활용한 연구가 있는데, Kim and Kim (2017)은 해모수와 윈드라이다의 관측결과를 비교·분석하여 검증하였고, 윈드라이다를 이용한 관측이 기상탑에서의 실측을 충분히 대체할 수 있을 만한 높은 상관성을 나타냄을 보였다. Lee et al. (2013)은 서남해상 지역의 풍황특성을 분석한 후 이를 바탕으로 풍력터빈 기종별로 생산 가능한 풍력에너지 밀도를 평가하여 최적의 풍력터빈을 선정하였다. 그리고 Oh et al. (2012)은 해모수의 단기간 풍황자료를 MCP (Measure-Correlative-Predict) 기법을 적용하여 장기간 자료로 변환 후 풍력에너지

밀도를 산출하고 평가하였다. Kim et al. (2013)의 연구에서는 NASA에서 생산한 MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) 재분석 자료를 전산유체역학 기반 풍력발전 진단 프로그램인 WindSim에 입력하여 해상풍력발전 예정지와 그 주변 섬에 의한 풍속 저감(Velocity deficit) 분석을 수행하였다.

그리고 이외에도 한반도의 해상 풍력자원을 분석한 연구들이 다소 있는데, Kim (2008)은 남한의 육·해상 풍력자원의 이론적·지리적·기술적·공급가능 잠재량을 산정한 연구를 수행하였고, Kyong et al. (2003)은 ADEOS (Advanced Earth Observing satellite) II 위성의 QuikSCAT (Quick Scatterometer) 해상풍 자료를 이용하여 한반도 해역의 해상풍력 자원을 평가하였다.

풍속의 세제곱에 비례하여 산출되는 풍력에너지 특성상 입력되는 풍속의 오차가 커질수록 그 변동성도 커지며, 추후 풍력발전단지 운영 시 경제적 손실로 이어진다. 이에 따라 정확한 풍황분석을 위해 실측자료 기반의 연구가 요구된다. 본 연구에서는 서남해 해상 풍력발전단지 예정지에 설치된 해모수와 인근 고창 풍력기상자원 관측사이트의 바람자료를 이용하여 해상환경과 인접한 연안환경의 풍력기상자원 변화를 비

Table 1. Information of two observation sites.

Item	Southwestern Sea (HeMOSU-1)	Coastal area (Gochang)
Location	Latitude (°N)	35.47
	Longitude (°E)	126.13
Observation period	Jan. 2011~Dec. 2015 (60 months)	Jan. 2014~Dec. 2015 (24 months)

교 · 분석하고 이를 평가하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

한국전력공사에서는 해상풍력자원 관측 및 해양연구 지원을 위해 해모수를 서남해 해상에 설치하여 2010년부터 운영 중이다. 해모수를 중심으로 반경 10 km 이내에 섬이나 지형지물은 없으며, 가까운 섬은 안마도, 위도, 왕등도로 해모수로부터 각각 14 km, 17 km, 19 km 거리에 위치해 있다. 또한 해모수의 북동방향에 서남해 해상풍력발전단지 1단계 예정지가 위치하고, 동쪽 약 29 km 지점 연안에 고창 풍력기상 자원 관측사이트가 위치해 있다(Fig. 1). Table 1은 본 연구에 사용된 관측사이트의 위치와 관측기간을 나타낸다. 해모수에서 5년, 고창 관측사이트에서 2년간 관측된 자료가 사용되었다. 고창 관측사이트에는 기상탑과 50 m 거리 이내에 윈드라이다(Light Detection And Ranging, LiDAR)가 설치되어 있는데, 기상탑의 바람 자료를 기준으로 윈드라이다의 풍속과 비교한 결과 그 결정계수(R^2)는 0.86으로 높은 상관성을 나타내어 윈드라이다 관측이 기상탑에서의 관측을 대체할 수 있다고 판단하였고, 본 연구에서는 윈드라이다의 관측자료가 분석에 사용되었다. 또한 기상탑과 윈드라이다에서 관측된 주풍향은 해상쪽인 북북서이고, 육상쪽인 남남동이 그 다음으로 높은 풍향비율을 차지하고 있다(Fig. 2).

2.1 관측 기기

해모수는 해저 15 m와 해상 100 m의 총 115 m 높이의 기상탑으로, 13~97 m 고도에서 풍속과 풍향을 관측한다. 온도, 습도, 기압은 13 m와 96 m 고도에서 관측된다. Table 2는 해모수에 설치된 바람 센서들과 고창 관측사이트에 설치되어 있는 윈드라이다의 사양을 나타낸다. 해모수에서 풍속과 풍향은 각각 8개와 4개의 고도에서 관측된다. 풍속 · 풍향계는 Vector Instrument 사의 제품으로 풍속계의 관측범위와 정확도는 각각 $0\sim75\text{ m s}^{-1}$ 와 0.1 m s^{-1} 이며, 풍향계의 오차범위는 3 m s^{-1} 이하에서 4° , 그 이상의 풍속에서는 1° 이다. 고창 관측사이트의 윈드라이다는 프랑스 Leosphere 사의 WINDCUBE V1으로 40~200 m 고도 범위 내의 10개 고도에서 풍속과 풍향을 관측한다. 풍

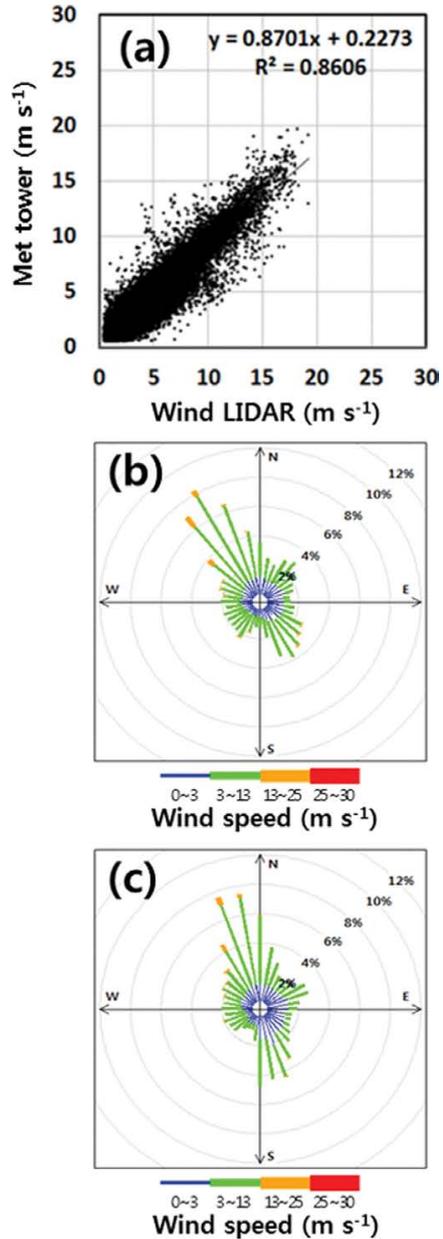


Fig. 2. Comparison of two instruments: (a) scatter plot of wind speed from met mast versus LiDAR, wind roses of (b) LiDAR and (c) met mast.

Table 2. Description of wind sensors on meteorological mast and LiDAR.

Item		Southwestern Sea (HeMOSU-1)	Coastal area (Gochang)
Instrument		Met mast	LiDAR
Type of sensor (accuracy)	Cup anemometer	Vector instrument A100M (1% ± 0.05 m s ⁻¹)	WINDCUBE V1 (0.2 m s ⁻¹ , 1.5°)
	Wind vane	Vector instrument W200P/L (1° at more than 3 m s ⁻¹)	
Observation height [m]		WS: 26, 46, 56, 66, 76, 86, 96, 97 WD: 46, 56, 76, 96	40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200

*WS: wind speed, WD: wind direction.

속의 관측 범위는 0.2~45 m s⁻¹이며, 풍속과 풍향의 관측 정밀도는 각각 0.2 m s⁻¹와 1.5°이다.

2.2 분석 방법

해상지역(해모수)과 인근 연안지역(고창)의 관측지점에서 취득된 10분 평균 바람자료를 이용하여 분석을 수행하였다. 대기하부경계층에서 바람의 연직분포를 나타내는 방법은 대수법칙(Logarithmic law)과 멱법칙(Power law)이 주로 이용되고 있으며, 풍력터빈의 설계요구사항인 IEC 61400-1 (Wind turbines-Part 1: Design requirements)에서는 멱법칙을 채택하고 있다. 멱법칙은 이론적으로 한 수가 다른 수의 거듭제곱으로 표현되는 두 수의 함수적 관계를 나타내는데, 대기안정도가 중립인 경우 대기하부경계층에서도 높이에 따라 풍속이 일정하게 증가하는 연직분포가 나타나 멱법칙 적용이 가능하다. 이로부터 계산되는 멱지수(Power law exponent, α)는 관측지점 주변의 지표상태를 따르는 보정계수를 의미하고, 식 (1)과 같다 (Zhang, 2015).

$$\text{Power law exponent} = \frac{\ln(U/U_r)}{\ln(Z/Z_r)} \quad (1)$$

여기서, Z 는 고도, Z_r 은 기준 고도, U 는 해당 고도의 풍속, U_r 은 기준 고도의 풍속이다.

난류강도(Turbulence Intensity, TI)는 IEC에서 제시한 식 (2)를 활용하였다.

$$TI = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (2)$$

여기서, σ 는 풍속의 표준편차, \bar{V} 는 풍력터빈의 허브높이 풍속으로 평균풍속과 풍속의 변동성에 대한 비를 의미한다. 본 연구에서는 10분 평균 바람자료를 이용하여 난류강도를 산정하였다. 그리고 일반적으로 풍속의 출현빈도를 나타내기 위한 확률분포는 2개의 매개변수를 이용한 와이불(2-parameters Weibull distribution) 분포가 사용되며 식 (3)과 같다(Manwell

et al., 2002).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (k > 0, V > 0, c > 1) \quad (3)$$

여기서, k 는 형상계수(shape parameter), c 는 척도계수(scale parameter)이다. 또한 서남해 지역의 잠재풍력 발전량을 평가하기 위해 풍력에너지 밀도(Wind Power Density, WPD)를 산출하였으며, 이는 식 (4)와 같다 (Brower, 2012).

$$WPD = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \rho_{air} V^3 \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (4)$$

여기서, N 은 관측 기간 동안의 자료 수, ρ_{air} 은 공기밀도, V 는 풍속, WPD는 단위면적당 풍력에너지 밀도이다.

3. 분석결과

3.1 고도별 풍속 분포

Figure 3은 두 관측 지점의 고도별 풍속의 일변화를 나타낸 것이다. 두 지점의 풍속 모두 고도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보인다. 해모수에서 풍속의 최하층과 최상층 관측고도인 26 m와 96 m 고도 간의 풍속차는 약 0.8 m s⁻¹이다. 고창의 경우에는 최저 40 m와 최고 200 m 고도 사이에 약 1 m s⁻¹의 풍속차를 보인다. 연안지역에 위치한 고창의 주변 지표면 거칠기가 낮기는 하나 해모수가 설치된 해상의 거칠기 보다는 상대적으로 높기 때문에 고창에서의 풍속의 연직 경도가 더 크게 나타난다. 또한 해모수의 고도별 풍속 차이는 하루 동안 큰 변화가 없이 유지되지만, 고창의 경우에는 주간에 고도별 풍속 차이가 감소하는 경향을 보인다. 즉, 일출 후 오전 9시를 기점으로 모든 고도의 풍속이 비슷한 값을 보이고, 이러한 경향은 15시까지 이어지다 이 이후의 시간대에서 고도간 풍속 변동폭이 다시 증가하기 시작한다. 이는 태양복사에 의해 지표면 온도가 상승하고 상승한 온도에 의해 난류가 증가하여 대기 하층

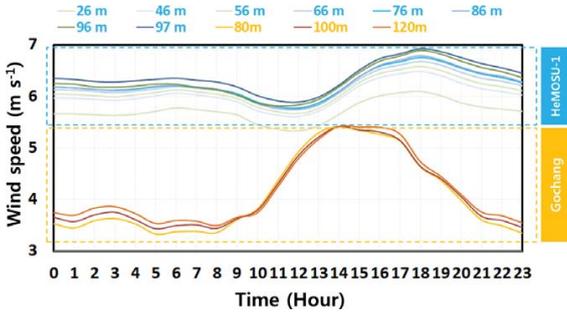


Fig. 3. Diurnal variations of mean wind speed at HeMOSU-1 (blue) and Gochang observation site (orange).

과 상층간의 대류작용이 활발해지기 때문이다. 고창은 해상으로부터 수평거리로 약 100 m 밖에 떨어져 있지 않으나, 해상에 위치한 해모수와 비교하면, 낮 시간 동안 고도별 풍속 차이가 거의 없어 지표의 영향을 받고 있음을 뚜렷하게 보여준다. 또한 육·해상 환경차이는 태양복사 에너지에 의해 발생하는 최대풍속 시간대에도 영향을 준다. 고창에서 최대풍속이 나타나는 시간대는 14시경인 반면, 해모수는 17~18시경에 최대풍속을 보인다. 해모수는 상대적으로 풍속의 변동속도가 느리고 그 변동폭도 고창에 비하여 작다.

두 관측 지점에서 3 MW 풍력터빈의 발전고도인 약

80 m 높이의 평균 풍속은 해모수(76 m) 6.5 m s^{-1} , 고창(80 m) 4.9 m s^{-1} 이다. 즉 동서로 약 29 km 떨어진 해상과 육상(연안)지역의 풍속 차이는 약 25%로, 이는 지면마찰 등으로 인하여 지표풍속이 감소되었기 때문이다.

3.2 계절별 풍속 분포

Figure 4는 해모수와 고창의 계절별 풍속 일변화를 보여준다. Figure 3과 유사하게 계절별 풍속도 고창보다 해모수에서 높게 나타났으며, 풍속이 강한 겨울과 약한 여름의 풍속 차이는 고창 2.4 m s^{-1} , 해모수 1.8 m s^{-1} 이다. 또한 풍속의 일변화 폭은 연안지역에 위치한 고창이 계절에 따라 $1.5\sim 2.3 \text{ m s}^{-1}$ 범위를 보여 1 m s^{-1} 미만의 일변화를 보인 해모수보다 크다. 특히 고창은 가을에 2.3 m s^{-1} , 해모수는 여름에 1.0 m s^{-1} 의 가장 큰 풍속의 일변화를 보였고, 이는 각각 해륙풍과 계절풍의 영향으로 판단된다. 또한 해모수의 야간 풍속은 평균 6 m s^{-1} 내외로 큰 변화를 보이지 않다가 겨울에만 7 m s^{-1} 이상으로 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 북서 계절풍의 영향으로, 겨울의 주·야간 모든 시간대에 영향을 미쳐 평균 풍속의 증가를 야기시킨다. 겨울의 풍력발전고도에서의 평균 풍속은 해모수 7.5 m s^{-1} , 고창 6.1 m s^{-1} 으로 가장 작은 풍속 차이(18%)를, 여름에 해모수 5.7 m s^{-1} , 고창 3.8 m s^{-1} 으로 가장 큰 풍속 차이(34%)를 보인다. 그리고 봄과 가

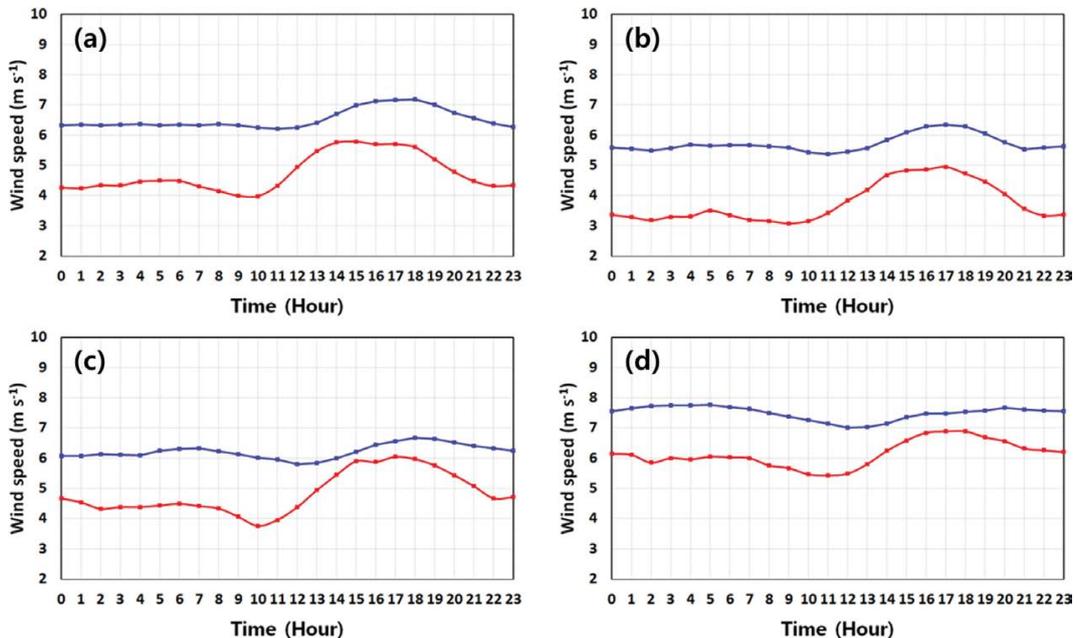


Fig. 4. Diurnal variations of seasonal mean wind speed at HeMOSU-1 (blue) and Gochang observation site (red): (a) spring, (b) summer, (c) fall and (d) winter.

Table 3. Prevailing wind direction and its occurrence frequency at HeMOSU-1 and Gochang observation site.

	Southwestern Sea (HeMOSU-1)		Coastal area (Gochang)	
	Prevailing wind direction	Frequency [%]	Prevailing wind direction	Frequency [%]
Annul mean	NNW	15.3	NNW	16.4
Seasonal				
Spring	NNW	15.2	NNW	16.1
Summer	S	15.5	SSE	12.5
Fall	NNW	18.2	NNW	15.3
Winter	NNW	21.9	NNW	21.2
Hourly				
00	NNW	13.8	NNW	12.4
01	NNW	13.3	SSE	13.2
02	NNW	12.7	SSE	12.7
03	NNW	13.1	SSE	12.2
04	NNW	12.4	SSE	13.2
05	NNW	11.7	SE	12.7
06	NNW	11.1	NE	13.5
07	NE	10.6	NE	14.0
08	NE	10.6	SE	13.9
09	NE	10.1	SE	12.9
10	NNW	10.7	NNW	13.6
11	NNW	12.3	NNW	17.4
12	NNW	13.3	NNW	18.9
13	NNW	16.0	NNW	22.5
14	NNW	19.0	NNW	23.9
15	NNW	21.4	NW	24.8
16	NNW	22.6	NNW	29.6
17	NNW	23.4	NNW	32.5
18	NNW	22.6	NNW	27.1
19	NNW	20.6	NNW	25.0
20	NNW	18.3	NNW	19.7
21	NNW	17.1	NNW	17.8
22	NNW	16.0	NNW	14.4
23	NNW	14.7	NNW	13.3

을은 각각 28%와 22%의 유사한 풍속차이를 나타낸다.

3.3 주 풍향 분석

Table 3은 두 관측지점에서 계절과 일중 시각에 따른 주 풍향과 그 비율을 보여준다. 두 지점 모두 북북서풍 계열이 주 풍향으로 계절별로는 겨울에 해모수와 고창의 북북서풍 비율이 각각 21.9%와 21.2%로 타 계절에 비해 높다. 이는 겨울에 시베리아 고기압의 영향으로 한반도 전체에 북서 계절풍이 탁월하기 때문이다. 반면 여름의 경우 해모수와 고창의 주풍향(비율)은 각각 남풍(15.5%)과 남남동풍(12.5%)으로 겨울과는 반대의 경향을 보이는데, 이는 여름에 남서 계절풍의 영향으로 남풍기류가 뚜렷하게 나타나기 때문이다.

시각에 따른 풍향의 변화를 살펴보면 해모수의 경우, 모든 시간대에 북풍 계열의 바람이 우세하다. 일출 시간인 약 7시를 기점으로 북동풍이 우세해지기 시작하다, 10시 이후 다시 북북서풍의 비율이 높아지며, 특히 13~22시에 북북서의 주 풍향의 비율이 상대적으로 증가하는 경향을 보인다. 고창의 경우, 해륙풍의 영향이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 자정부터 아침 9시경까지 대체로 남동 또는 남남동쪽 풍향 비율이 높게 나타나는데, 관측지점을 중심으로 남동방향에 육지가 위치하여 육풍의 영향을 지배적으로 받은 것으로 보인다. 10시 이후부터 해안이 위치한 북북서로 풍향이 바뀌면서 해풍의 영향이 우세해지고, 이러한 영향은 자정까지 이어진다.

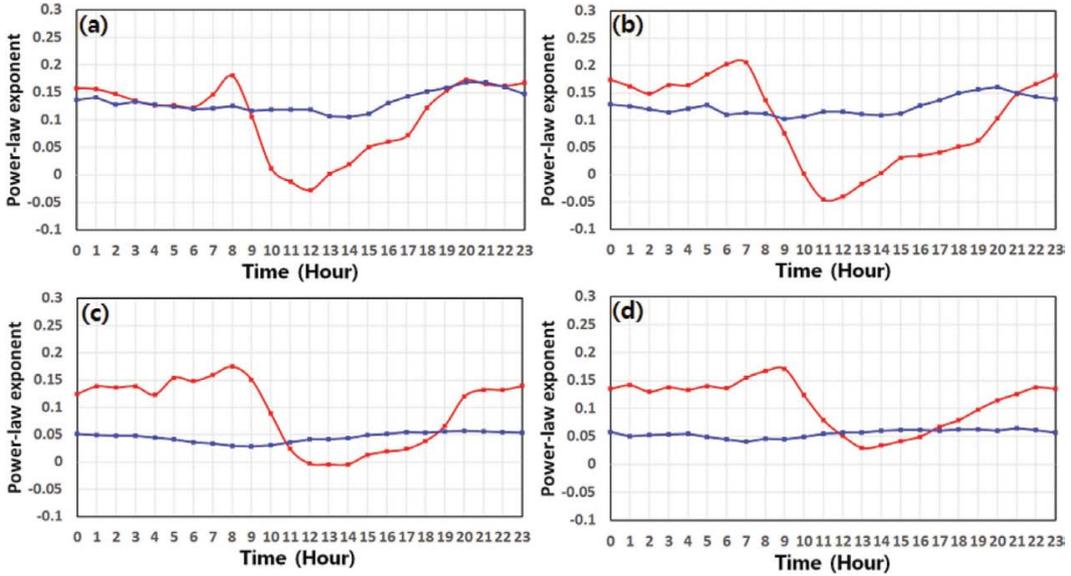


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for power law exponent.

3.4 멱지수 분석

Figure 5는 계절별 해모수와 고창의 멱지수 일변화를 나타낸다. 두 지점간의 멱지수 일변화는 뚜렷한 차이를 보인다. 사계절 동안 멱지수의 일변화는 해모수가 0.03~0.17, 고창이 -0.05~0.21로 고창의 일변화 폭이 상당히 크게 나타났다. 해모수의 경우 계절별로 멱지수 차이가 크지만 일변화는 거의 차이가 없이 일정한 경향을 보이는 반면, 고창의 경우 정오를 전후로 멱지수가 음의 값을 보여 풍속의 연직 프로파일이 역구배를 형성함을 알 수 있다. 육상에서 지표 부근의 풍속이 강해지는 이러한 현상은 여름에 더욱 뚜렷해지며 멱지수의 일 변동폭을 더욱 증가시킨다. 또한 겨울에 고창에서의 멱지수 크기가 가장 작고 다른 계절과 마찬가지로 주간에는 멱지수가 감소되는 경향을 보이나 상대적으로 그 폭이 작음을 알 수 있다.

관측 사이트 주변 지표상태가 풍황에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해 16방위에 따른 멱지수 분포를 분석하였다(Fig. 6). 일반적으로 지형에 따른 멱지수 값은 바다의 경우 0.1~0.15이고, 평탄지형의 경우 초원에서 0.12~0.25, 산림(숲)에서 0.25~0.40이다. 복잡지형의 경우 멱지수 값은 다양한 지표면 거칠기에 의해 0.1~0.6의 비교적 넓은 범위가 제시된다(Kor and Huh, 2006). 고창의 경우 관측사이트를 중심으로 북동쪽과 남쪽에 숲이 형성되어 있고, 남동쪽으로는 도로와 공터가 위치해 있어 멱지수가 높은 경향을 보인다. 반면 해안이 위치한 서쪽의 멱지수는 낮다. 해모수의 경우 전 풍향에 대해 0.2 이하의 작은 멱지수를 보이는데, 특히 북쪽과 서쪽에서 약 0.1로 더 낮다.

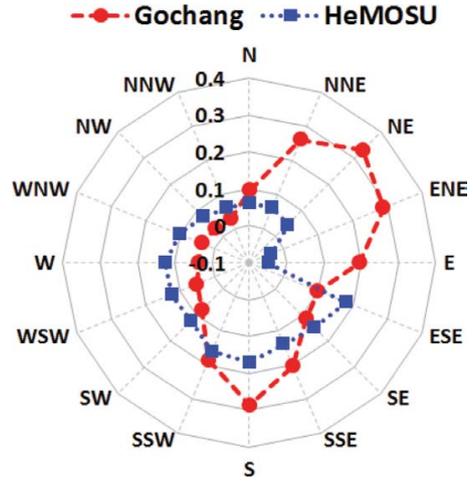


Fig. 6. Directional statistics of power law exponent at two observation sites.

동남동풍 계열이 약 0.2로 최대 멱지수가 나타나는 반면, 이와 30도의 풍향 차이를 갖는 동풍 계열에서는 0.04로 가장 낮은 멱지수를 나타낸다. 이러한 원인을 파악하기 위해 Fig. 7에 해모수의 96 m와 97 m 고도의 풍속의 비를 풍향에 따라 나타내었다. 이는 96 m와 97 m 풍속계가 각각 기상탑의 측면과 상단에 설치되어있기 때문에, 기상탑에 의한 유동 왜곡(Flow distortion)이 풍속에 미치는 영향을 살펴보기 위한 것이다. 유동왜곡이 없는 환경이라면 고도 차이가 1 m

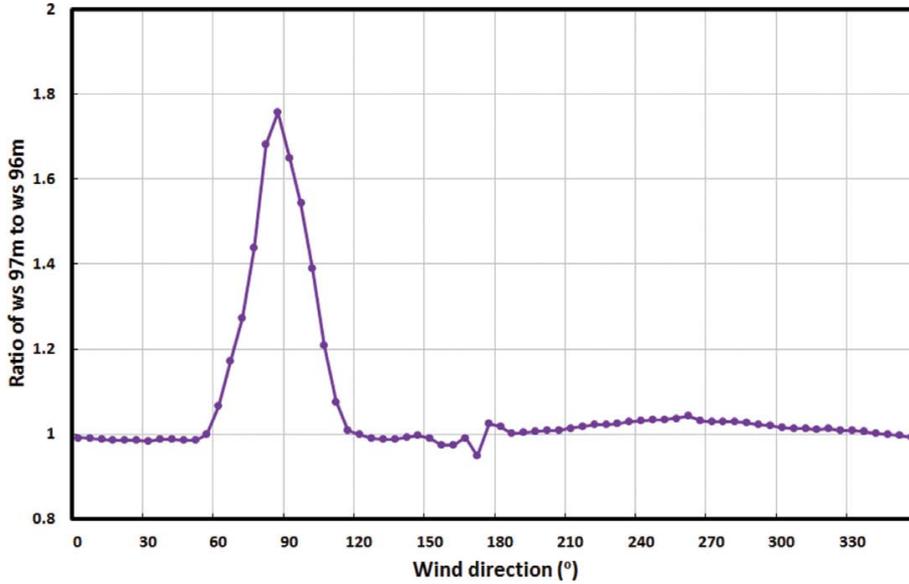


Fig. 7. Tower distortion ratio as a function of wind direction for anemometers at 97 m and 96 m height.

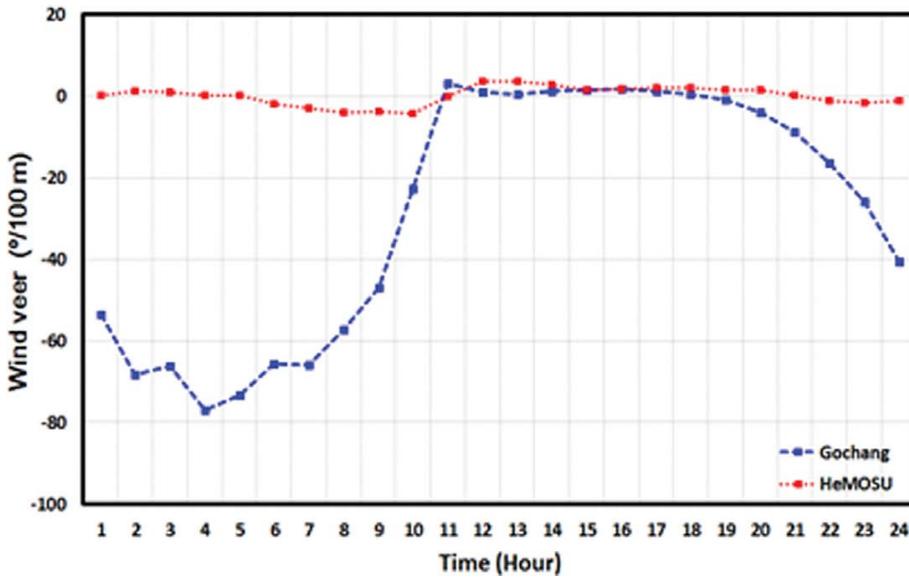


Fig. 8. Diurnal variations of wind veer - vertical change of wind direction - at HeMOSU-1 (red) and Gochang observation site (blue).

밖에 나지 않기 때문에 그 풍속의 비가 전체적으로 1에 가까운 값을 나타내어야 한다. 하지만 동풍에 해당하는 약 90° 섹터의 풍속의 비가 1.6 이상의 값을 보이는데, 이는 96 m의 풍속계가 기상탑의 서쪽에 설치되어 동풍이 유입될 때 기상탑의 후류에 의한 차폐 효과(Tower shadow)가 발생했기 때문이다. 다만, 차폐

효과의 영향을 받은 자료의 비율은 전체 자료의 2.7%로 그 비율이 작기 때문에, 본 연구에서는 필터링 처리 없이 분석을 수행하였음을 밝혀둔다.

3.5 연직풍향 분석

Figure 8은 일주기에 따른 풍향 순전(Wind veering)

의 변화를 나타낸 것으로, 풍향 순전의 양(Positive)의 값은 고도가 증가함에 따라 시계방향으로 풍향이 변화하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 100 m당 풍향의 변화로 나타내었다. 전체적으로 해모수의 일별 풍향 순전은 극히 작은 반면, 고창에서는 일몰시간인 18시경부터 풍향 반전이 급격히 발생하면서 야간 3~4시경에 가장 큰 값을 보인다. 그 후 일출 시간인 8시경부터 풍향 반전이 빠르게 감소하며, 주간 11시경에 거의 0°에 가까운 값을 나타낸다. 이러한 경향은 일몰 시간 전까지 나타나며, 주간과 야간의 뚜렷한 차이를 보인다. 해모수의 경우 주간 11시를 기점으로 풍향 순전이 음에서 양의 값으로 바뀌었으며, 일 변동폭은 -4.39°~3.62°를 나타내었다. 고창의 경우 주간에 양의 값을 보였으며, 야간에는 음의 값이 지배적으로 일 변동폭은 -76.96°~2.99°이다. 해모수와 고창의 평균적인 풍향 순전 값은 각각 1.13°/100 m와 -6.01°/100 m로, 특히 고창의 경우 높이에 따른 반 시계 방향의 풍향 변화가 우세하였다.

3.6 난류강도 분석

난류는 풍력터빈이 겪는 피로하중과 출력성능에 중요한 영향을 미치므로 풍력자원을 활용하는데 필수적으로 고려해야할 요소이다. Table 4와 같이 IEC에서

Table 4. Standard parameters for wind turbine classes.

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ref} (m s ⁻¹)	50	42.5	37.5	
A I_{ref} (-)		0.16		Values specified by the designer
B I_{ref} (-)		0.14		
C I_{ref} (-)		0.12		

는 풍력터빈의 등급을 풍속(V_{ref})에 따라 3등급(I, II, III), 난류강도(I_{ref})에 따라 4등급(S, A, B, C)으로 구분한다. 이 중 난류강도 등급은 15 m s⁻¹ 구간에서의 평균 난류강도를 이용하여 산정된다.

Figure 9는 계절별 풍속에 따른 난류강도의 변화를 나타낸다. 계절별 난류강도는 계절 특성이 반영된 대기안정도, 지표상태 등에 따라 변동하며, 전체적으로 해모수의 난류강도가 고창보다 낮다. 해모수의 난류강도는 모든 계절에서 0.12 이하로 IEC 난류특성 카테고리 C에 해당한다. 고창의 경우 해모수에 비해, 그 계절적 변동 특성이 더욱 뚜렷하다. 겨울에는 상대적으로 대기가 안정하여 가장 낮은 난류강도를 나타내는 반면 여름은 평균적인 대기의 불안정도가 증가함에 따라 풍속의 표준편차가 증가하고 강한 난류강도가 발생함을 알 수 있다. 고창의 난류강도는 0.14로

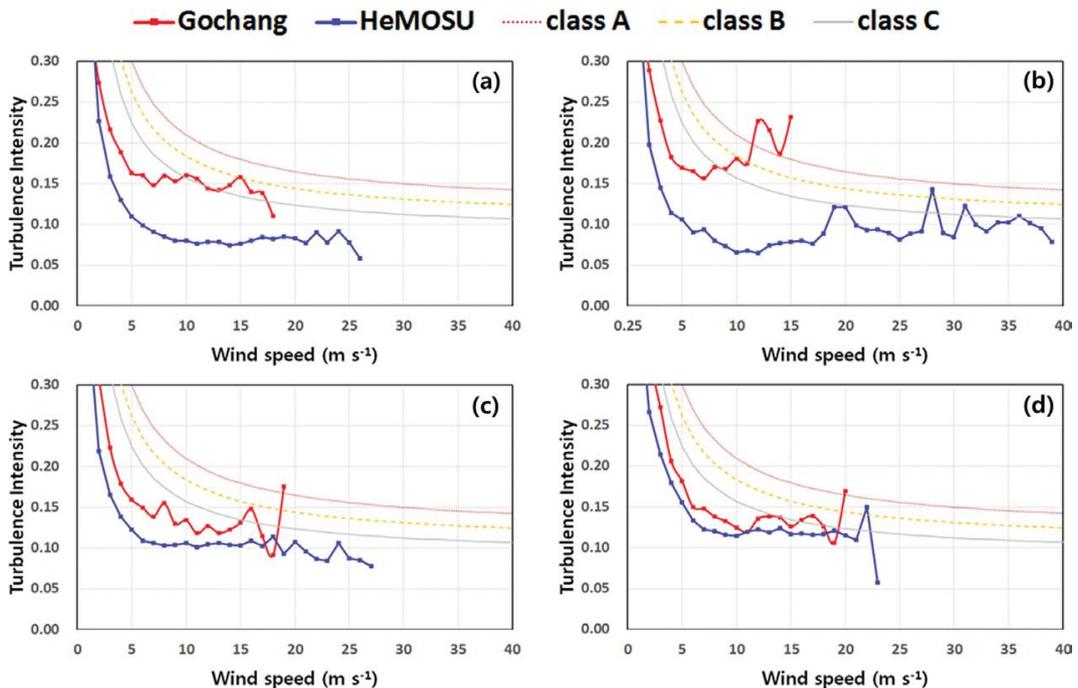


Fig. 9. Variations of seasonal mean turbulence intensity with wind speed at HeMOSU-1 (blue) and Gochang observation site (red): (a) spring, (b) summer, (c) fall and (d) winter.

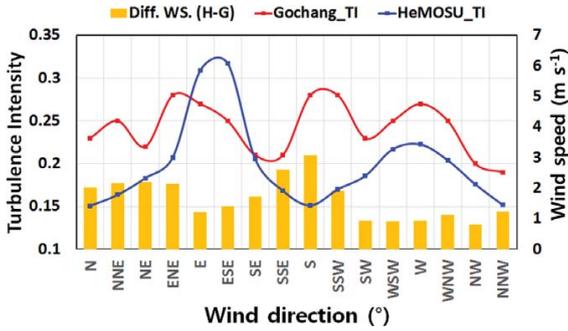


Fig. 10. Distributions of turbulence intensity and difference of wind speed between two observation sites with wind direction.

IEC 난류특성 카테고리 B에 해당하며, 해상에서 육상인 연안지역으로 지표상태가 바뀌면서 난류강도가 증가한 것으로 판단된다.

Figure 10은 두 지점의 풍향에 따른 난류강도와 풍속 차이를 보여준다. 동풍 계열을 제외하고는 모든 풍향에서 해모수에 비하여 고창의 난류강도가 강한데, 동풍계열의 경우 해모수는 기상탑의 차폐 효과에 의해 풍속이 저감되고 그 표준편차가 증가하여 난류강도가 큰 것으로 판단된다(Fig. 7). 해모수의 경우 주변에 지형지물이 없기 때문에 난류강도 증가에 직접적인 영향을 미치는 요인은 없으며, 해모수 주변에 작은 섬이 위치해 있기는 하지만 이격 거리가 약 14~19 km 이므로 그 영향은 미미하다.

풍향이 남풍계열인 경우 두 지점간 난류강도 차이가 가장 크게 발생하였으며, 이때 두 지점간의 풍속은 약 3 m s^{-1} 의 차이를 보인다. 고창 관측지점의 남쪽에 약 5~9 m 높이의 나무로 이루어진 숲이 위치하여 지표면 거칠기가 높으며, 따라서 나무와 수풀에 의한 유동 왜곡이 고창의 난류강도 증가와 풍속 저감을 야기시킨 것으로 판단된다. 그리고 서풍의 경우 바람이 해모수가 설치된 서남해 해상에서 고창의 인접해역으로 유입되면서, 해모수와 고창의 난류강도는 각각 0.22와 0.27로 약 0.05의 다소 작은 차이를 보인다.

3.7 풍력에너지 밀도 분석

Figure 11은 풍속의 발생빈도와 풍력에너지 밀도를 Weibull 분포로 나타낸 것이다. 해모수의 경우, 측정기간 중 4차례(2011년 Muifa, 2012년 Qanun와 Bolaven, 2015년 Chan-hom)의 태풍의 직접적인 영향을 받았으며, 이 기간 중에 풍력터빈의 종단풍속인 25 m s^{-1} 이상의 강한 바람이 관측되었다. 풍속대별로는 약 $3\sim 5 \text{ m s}^{-1}$ 의 바람이 전체의 33.9%로 가장 큰 비율을 차지한다. 고창의 경우 상대적으로 낮은 풍속

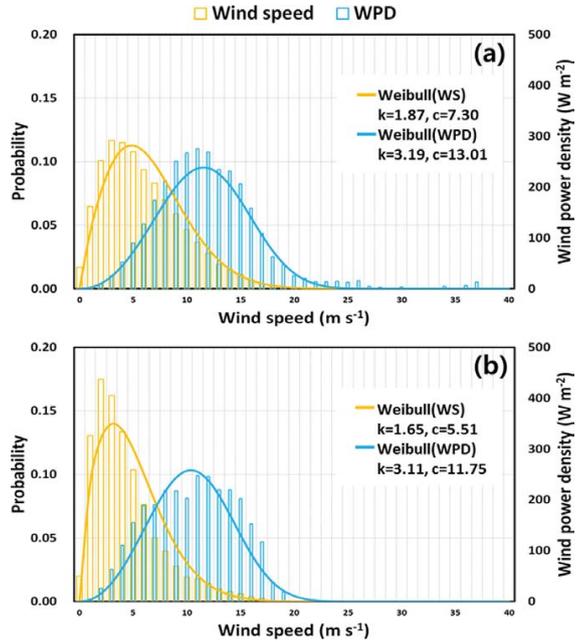


Fig. 11. Distributions of probability of wind speed and wind power density derived from estimated Weibull probability density function at (a) HeMOSU-1 and (b) Gochang observation site.

Table 5. Annual and seasonal mean wind power densities at two observation sites.

	Total wind power density (W m^{-2})	
	Southwestern Sea (HeMOSU-1)	Coastal area (Gochang)
Annual	363.7	191.4
Spring	378.4	168.4
Summer	303.7	73.7
Fall	312.1	170.6
Winter	470.5	337.7

대의 발생 빈도가 높으며, $2\sim 3 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속이 전체의 33.7%로 가장 높은 비율을 나타낸다. 풍속에 대한 Weibull의 형상계수(k)는 해모수와 고창에서 각각 1.87과 1.65 그리고 척도계수(c)는 각각 7.3 m s^{-1} 와 5.5 m s^{-1} 이다. 즉 해모수의 풍속 발생빈도가 고창에 비해 특정 풍속구간에 집중된 형태를 보이고 높은 풍속구간의 비율이 상대적으로 높다.

최대 풍력에너지 밀도를 나타내는 풍속 구간은 해모수와 고창 모두 $11\sim 12 \text{ m s}^{-1}$ 로, 각각 전체 자료의 6.4%와 3.7%의 작은 비율을 차지하는 반면 전체 풍력에너지 밀도의 18.9%와 20.5%로 상당히 큰 비율을

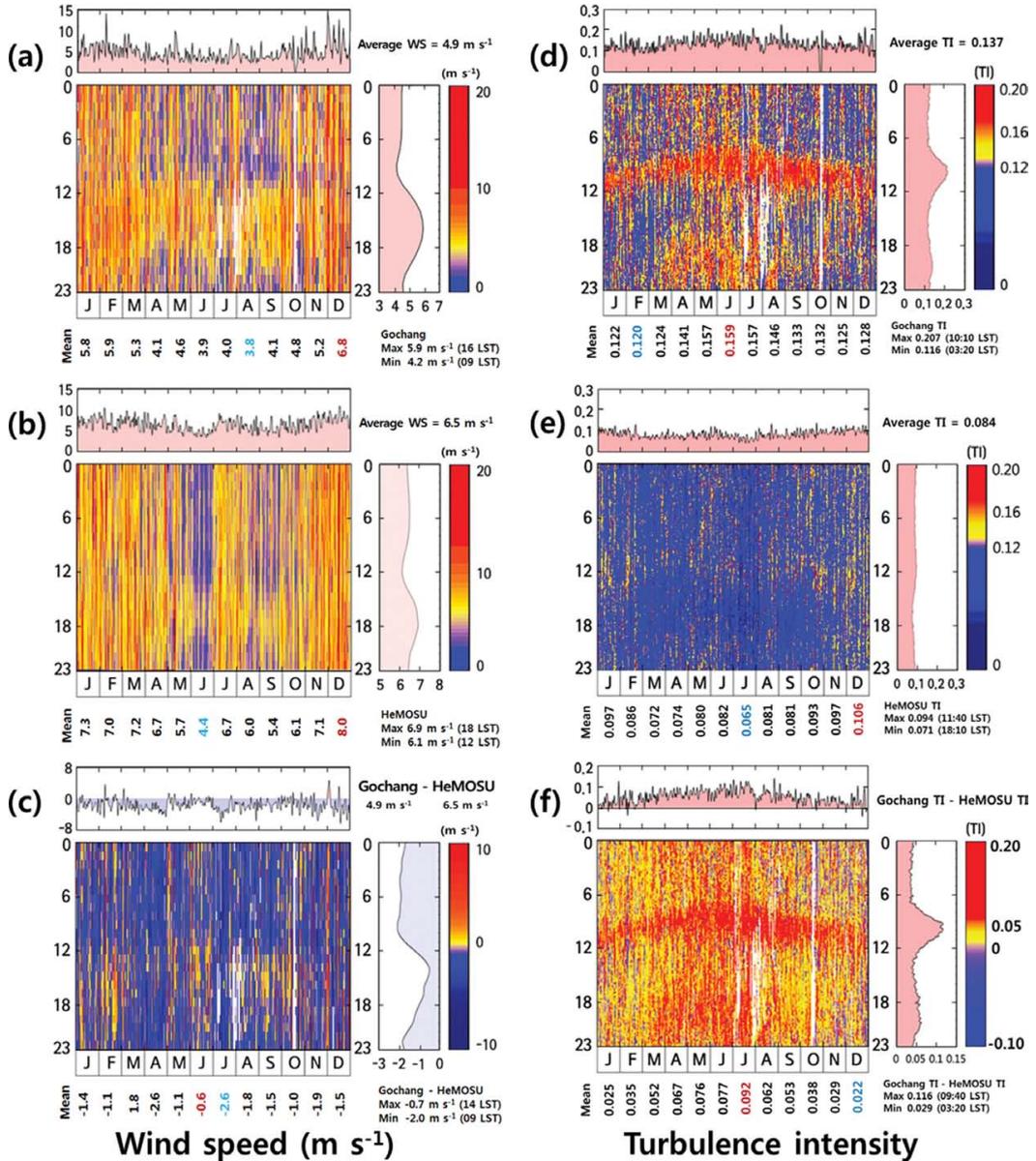


Fig. 12. Temporal variations of 10-min averaged wind speed (left) and turbulence intensity (right) observed at Gochang observation site (top), HeMOSU-1 (middle) and differences between two observation sites (bottom).

차지한다. 좀 더 자세한 두 지점의 연평균 및 계절별 풍력에너지 밀도는 Table 5에 나타내었다. 두 지역 모두 겨울과 여름에 각각 최대와 최소의 풍력에너지 밀도를 보이고 해모수의 경우 겨울-봄-가을-여름 순으로 높으며, 고창의 경우 봄과 가을의 풍력에너지 밀도가 비슷하다. 두 지점의 관측 기간 동안 연평균 풍력에너지 밀도는 해모수 363.7 W m⁻², 고창 191.4 W m⁻²로 약 47%의 차이를 보이고, 계절에 따라서는 28~76%

까지 차이를 보인다. 이는 두 지점간 이격 거리가 약 30 km 이내이지만, 해상과 육상의 지표조건이 풍력발전에 미치는 영향이 지배적임을 시사한다.

3.8 관측지점의 일변동성 및 계절변화

두 관측지점의 풍속과 난류강도의 일별, 월별 변동 특성과 그 차이를 Fig. 12에 나타내었다. 고창의 연평균풍속은 4.9 m s⁻¹이고 8월의 평균풍속은 3.8 m s⁻¹

로 최소, 12월에는 6.8 m s^{-1} 로 최대이다(Fig. 12a). 시각 별로는 오전 9~10시부터 풍속이 차차 증가하여 오후 2~3시에 최대값을 보이고, 다시 감소한다. 하지만 겨울에는 야간에도 여전히 풍속이 강하게 유지됨을 알 수 있다. 해모수의 경우 연 평균풍속은 6.5 m s^{-1} 이고 6월에 4.4 m s^{-1} 로 가장 낮고, 12월에 8.0 m s^{-1} 로 가장 높다(Fig. 12b). Figure 12c는 고창과 해모수의 풍속 차이를 나타내는데, 해모수 풍속이 평균적으로 높기 때문에 음의 값이 주로 나타난다. 하지만 주간의 12~18시에는 고창의 풍속이 빈번하게 더 강해지는 경향이 나타나, 육상에 위치한 고창에서 풍속의 변동성이 큼을 알 수 있다.

고창의 난류강도(Fig. 12d)의 연 평균값은 0.14이고, 6월과 2월에 각각 0.16과 0.12로 최대와 최소의 월평균 난류강도를 나타낸다. 시각 별로는 일출 후 급격하게 난류강도가 증가하기 시작하여 오전 9시부터 정오 사이에 최대값을 나타낸 후 다시 감소하는 경향을 보인다. 또한 봄철과 여름철에는 18시 이후에 다시 난류강도가 강해지고 자정 이후 약해지는 2차 극값이 나타나는 특징을 보이는데, 이는 육풍의 영향으로 판단된다. 해모수의 난류강도(Fig. 12e)의 연 평균값은 0.08이고, 12월과 7월에 각각 0.11과 0.07로 최대와 최소의 월평균을 보인다. 정오 전후에 다른 시각에 비하여 상대적으로 난류강도가 강해지는 하지만 큰 일변화 경향성이나 계절 변동성이 나타나지는 않는다. 따라서 두 지점 간의 난류강도 차이(Fig. 12f)는 고창에서 극값이 나타나는 오전~정오 사이와 봄~여름철 야간에 가장 크며, 전체적으로 고창의 난류강도가 해모수에 비하여 강하다.

두 지점에서 이와 같은 풍속과 난류강도의 차이를 보이는 이유는 해상에서의 비열용량(Specific heat capacity)이 육상보다 크기 때문이다. 일출 후 태양 복사에너지에 의해 난류가 증가하고 대류작용이 활발해진다. 이에 따라 난류강도가 강해지고 풍속이 증가하게 되는데 이러한 현상은 육상이 해상에 비해 뚜렷하게 발생한다.

4. 결 론

본 연구에서는 서남해 해상풍력 개발 예정지에 설치된 해모수 기상탑과 인근 고창 풍력기상자원 관측 사이트의 윈드라이더 바람자료를 이용하여 해상환경과 연안환경의 풍력자원 특성을 비교 분석하였다. 풍력터빈(3 MW)의 발전고도인 약 80 m 높이에서의 평균 풍속은 해모수 6.5 m s^{-1} , 고창 4.9 m s^{-1} 로 두 지점간에 약 25%의 풍속 차이가 발생하였다. 이는 연안지역에 위치한 고창의 지표면 거칠기가 상대적으로 해모수 지역보다 크기 때문에, 지표 마찰로 인하여 풍

속이 감소하고 이에 따라 풍속의 연직 경도를 더욱 강하게 발달시켰기 때문이다.

풍향의 경우 두 지점 모두 북서풍 계열이 우세하지만 해륙풍 영향의 차이로 일변화에서는 두 지점 간에 차이가 발생하였다. 육풍은 일반적으로 연안지역에서부터 인접 해역까지 영향을 미치지만, 약 29 km 떨어진 해모수까지는 육풍의 영향이 미치지 않은 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 해풍이 육풍보다 강하기 때문에 육풍의 영향을 받지 않는 해모수 인근 해상은 온전히 해풍의 풍력자원을 활용할 수 있는 지점으로 판단된다.

그리고 해모수와 고창의 IEC 난류특성 카테고리는 C와 B로 고창에서 상대적으로 높은 난류강도를 나타내며, 겨울에는 안정된 대기상태로 인해 낮은 난류강도를 보이지만 여름에는 대기가 불안정해지면서 풍속의 표준편차가 증가하여 높은 난류강도가 나타난다. 또한 풍속의 Weibull 분포를 분석한 결과 해모수가 고창보다 상대적으로 풍속의 발생 빈도가 집중된 형태를 보이고 높은 풍속대의 발생 비율이 크게 나타났다. 이러한 분포로 인해 두 지점간의 평균 풍력에너지 밀도는 약 47%의 차이를 보여 상대적으로 해모수 지역의 풍력자원의 활용 가능성이 더 높음을 알 수 있다. 풍속, 풍향, 주변 지표면 거칠기, 고도에 따른 풍향변화, 난류강도 및 풍력에너지 밀도를 분석한 결과, 연안지역에 위치한 고창보다 해상의 해모수 인근 지역의 풍력자원이 우수하였다. 특히, 해모수 지역은 풍향 변화가 적고 난류강도가 낮으며 풍속의 변동성이 적어 풍력발전에 지리적 위치가 중요한 요인 중 하나임을 시사한다.

전 세계적으로 향후 화석연료를 대신할 대체에너지 중 풍력에너지가 큰 비중을 차지할 것으로 전망되고 있다. 우리나라 역시 대규모 해상 풍력발전단지 조성을 통해서 온실가스 감축과 전세계 기후변화 대응에 적극적으로 참여하고자 노력하고 있다. 따라서 한반도와 제주도 주변 해상환경의 정확한 풍력자원 분포, 수심, 해저지형과 지질 및 기타 어업환경, 해양생태계 등과 같은 종합적인 자료 수집 및 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 “기상업무지원기술 개발 연구”의 지원으로 수행되었습니다. 아울러 본 연구의 수행과정에서 관측에 도움을 주신 한국전력공사 관계자분들께 감사의 뜻을 표합니다.

REFERENCES

- Barthelmie, R. J., 1999: The effects of atmospheric stability on coastal wind climates. *Meteorol. Appl.*, **6**, 39-

- 47.
- _____, S. T. Frandsen, M. N. Nielsen, S. C. Pryor, P.-E. Rethore, and H. E. Jørgensen, 2007: Modelling and measurements of power losses and turbulence intensity in wind turbine wakes at Middelgrunden offshore wind farm. *Wind Energy*, **10**, 517-528.
- _____, and Coauthors, 2010: Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farms. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **27**, 1302-1317, doi:10.1175/2010JTECHA1398.1.
- Brower, M. C., 2012: *Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project*. Wiley & Sons, New Jersey, 296 pp.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2005: IEC 61400-1, Third edition. IEC, 85 pp.
- Kim, H.-G., 2008: Preliminary estimation of wind resource potential in South Korea. *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **28**, 1-7 (in Korean with English abstract).
- _____, M.-S. Jang, and S.-H. Ko, 2013: Long-term wind resource mapping of Korea west-south offshore for the 2.5 GW offshore wind power project. *J Environ. Sci. Int.*, **22**, 1305-1316, doi:10.5322/JESI.2013.22.10.1305 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. Y., and M. S. Kim, 2017: A comparison of offshore met-mast and lidar wind measurements at various heights. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, **29**, 12-19 (in Korean with English abstract).
- Kor, K. N., and J. C. Huh, 2006: *The Introduction to Wind Engineering*. MunUnDang, 256 pp (in Korean).
- Kyong, N. H., J. E. Yoon, M. S. Jang, and D. S. Jang, 2003: An assessment of offshore wind energy resources around Korean Peninsula. *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **23**, 35-41 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.-E., G. W. Kim, S.-T. Jeong, D. H. Ko, and K. S. Kang, 2013: Assessment of offshore wind energy at Younggwang in Korea. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **21**, 131-141, doi:10.1016/j.rser.2012.12.059.
- Manwell, J. F., J. G. McGowan, and A. L. Rogers, 2002: *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. WILEY, 590 pp.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), 2015: Implementation plan of the Southwestern sea offshore test site development project in Korea. *MOTIE*, 29 pp (in Korean).
- Oh, K.-Y., J.-Y. Kim, J.-K. Lee, M.-S. Ryu, and J.-S. Lee, 2012: An assessment of wind energy potential at the demonstration offshore wind farm in Korea. *Energy*, **46**, 555-563, doi:10.1016/j.energy.2012.07.056.
- Zhang, M. H., 2015: *Wind Resource Assessment and Micro-Siting: Science and Engineering*. WILEY, 320 pp.