



[2019-6-WD-003]

거시적 관점에서 본 남북한 풍력자원 비교평가

이정태¹⁾ · 김현구^{2)*} · 윤창열³⁾ · 강용혁⁴⁾

Macroscopic Comparison of Wind Resources between South and North Korea

Jung-Tae Lee¹⁾ · Hyun-Goo Kim^{2)*} · Chang-Yeol Yun³⁾ · Yong-Heack Kang⁴⁾

Received 14 February 2019 Accepted 27 March 2019

ABSTRACT This study compared and evaluated the wind resources of North and South Korea macroscopically in the preparation for future energy cooperation. To this end, the Korea wind resource map of the Korea Institute of Energy Research, in which its accuracy has been validated, was used. The onshore wind resource was analyzed by the terrain elevation category, while the offshore wind resource was analyzed by the water depth and distance to shore categories. North Korea was found to have a five times larger feasible onshore area, where the wind class is over level 3, and a 2.1 times larger feasible offshore area, where the wind class is over level 4, water depth is less than 50 m, and distance to shore is less than 70 km. On the other hand, despite the average terrain elevation of North Korea being double that in the South, the average wind power density of onshore in North Korean is similar to that of South Korea, while the average wind power density offshore in North Korean is lower than that of South Korea. The feasible area of the wind farms identified in this study will be used to establish renewable energy development strategies of North Korea in the near future.

Key words Wind resource map(풍력자원지도), South Korea(남한), North Korea(북한), Onshore wind power(육상풍력), Offshore wind power(해상풍력), Wind power density(풍력밀도), Terrain elevation(지형고도), Water depth(수심), Distance to shore(해안선 이격거리)

Nomenclature

CAPEX : Capital Expenditure

DEM : Digital Elevation Model

GEBCO : General Bathymetric Chart of the Oceans

GGC : GEBCO Guiding Committee

RDAPS : Regional Data Assimilation and Prediction System

USGS : United States Geological Survey

WMO : World Meteorological Organization

WRF : Weather Research and Forecasting

1) Postdoctoral Researcher, New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research

2) Principal Researcher, Center Chief, New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research

3) Senior Researcher, New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research

4) Principal Researcher, New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding author: hyungoo@kier.re.kr

Tel: +82-42-860-3376

Fax: +82-42-860-3462

Subscript

DS : distance to shore

TE : terrain elevation

WD : water depth

1. 서론

북한은 남한에 비해 1차 에너지 공급량이 2016년 기준으로 3.4%에 불과하며, 발전설비의 78%가 가동경력이 30년 이상인 노후장비인 관계로 극심한 에너지 결핍과 더불어 불안정한 전력공급을 겪고 있다^[1]. 북한은 에너지 문제 해결을 위해 2013년 ‘재생에너지법’을 제정하고 2044년까지 풍력과 태양광으로 5GW를 보급하겠다는 계획을 발표하였으나, 기술 성숙도가 낮아서 자체적인 기술로는 목표달성은 어려울 것으로 판단된다^[2].

만일 남북한 산업협력을 통하여 남한의 재생에너지 산업 기술이 북한에 유입된다면, 북한 경제성장의 전제조건인 에너지 인프라 확충이 가능할 것으로 기대되며, 통일을 대비한 남북한 에너지 협력기반을 다질 수 있다.

태양광 발전과는 달리 발전용량의 규모가 큰 풍력발전단지 개발은 사전 타당성 연구를 통한 후보 입지 선정과정이 매우 중요하다. 입지평가시 환경규제 등 많은 제약조건을 고려해야 하지만 가장 중요한 것은 풍력자원평가이다.

남한의 경우 한국에너지기술연구원에서 구축한 풍력자원 측정 데이터베이스(KIER-WindData; 측정고도 지상 30m~100m) 및 풍력자원지도(KIER-WindMap; 분석고도 지상 40m, 80m, 120m)가 풍력자원평가의 중요한 기준자료로 활용되고 있지만^[3,4], 북한은 재생에너지 기술개발이 활성화되지 못한 관계로 이러한 핵심자료의 구축은 초기단계에 머무르고 있다.

남한 연구자가 수행한 북한 풍력자원에 대한 선행연구는 세계기상기구(WMO)를 통하여 입수 가능한 지상관측자료(측정고도 지상 10m)를 이용하였기 때문에 고산지대인 북한의 지형특성과 상반되는 분석결과를 보고하고 있다^[5]. 즉, 장진 지상관측소의 풍력밀도 175W/m²(지상 80m 높이)를 북한내 최대값으로 추산하였는데, 이는 바람등급(wind class) 2등급 이하이므로 풍력자원으로서의 가치가 매우 낮은 수준에 해당한다^[6].

본 연구에서는 관측높이가 MW급 풍력터빈 허브높이의 1/8에 불과한 지상관측자료의 관측높이 한계와 지형고도의 대표지점이 아닌 유지보수를 위해 유인환경에 위치함에 따른 지형고도 대표성 왜곡을 극복하기 위하여 한국에너지기술연구원에서 구축한 한반도 고해상도 풍력자원지도를 이

용하여 남한과 북한의 풍력자원을 거시적 관점에서 비교하였다. 즉, 육상풍력에 대해서는 지형고도의 측면에서, 해상풍력에 대해서는 수심과 이격거리의 측면에서 풍력자원의 분포특성을 분석하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 풍력자원지도

한국에너지기술연구원 풍력자원지도는 중규모(mesoscale) 수치기상예측 모델인 WRF를 이용하여 다년간의 바람장을 1km급 공간해상도로 수치예측함으로써, 한반도 전역에 대한 풍력자원의 3차원 정보를 제공한다^[4]. 풍력자원지도 작성시 관측자료와의 검보정이 수행되었으며^[7], 한국전력거래소의 풍력발전량과 높은 상관도($R^2 > 0.76$)를 가짐을 검증한 바 있다^[8]. 또한 위성영상으로 산출한 해상풍과도 높은 상관성을 보이며^[9], 해외의 상업 풍력자원지도보다 더 높은 정확도를 가짐을 확인하였다^[10].

풍력자원지도는 풍력터빈 회전고도를 정확하게 나타내기 위하여 조밀한 수직격자(10m)로 설계되었다. 초기조건 및 경계조건 자료로는 기상청 지역모델인 UM-RDAPS 12km L70이 사용되었으며, 적분 시간에 따라 증가하는 수치모델의 오차를 줄이기 위해 기상청 관측자료(AWS/ASOS, Sonde/Wind profiler, Buoy)의 4차원 자료동화가 수행되었다. WRF 모델의 물리과정 등 자세한 설정은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Model configuration of WRF

Model	Advanced Research WRF V3.7.1
Period	One year for 2012
Input data	Unified Model 12 km / WRF 3 km
SST	OSTIA SST
Terrain	SRTM data (3 arc-seconds)
Land cover	MODIS EGIS
Grid	933 × 1332 (1 km)
Vertical levels	37 levels
Data assimilation	Four-Dimensional Data Assimilation
Surface physics	Mellor-Yamada-Janjic scheme
Cloud micro physics	WSM 3-class ice scheme
Cumulus physics	No cumulus physics
Land surface	Noah-MP LSM

2.2 지형고도

풍력자원과 지형고도의 연관성 분석을 위해 풍력자원지도 공간해상도와 동일한 해상도의 수치고도모델(DEM) 자료인 USGS의 1km DEM 자료를 사용하였다(Fig. 1).

지형고도에 따른 풍력자원의 분포특성을 비교하기 위해

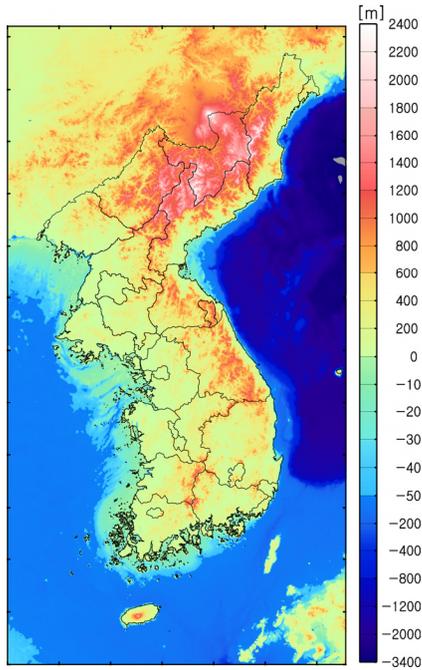


Fig. 1. Topography and bathymetry of the Korean Peninsula (terrain elevation and water depth : m)

Table 2. Categorization of analysis parameters

Terrain elevation category	Elevation range (m)	Distance to shore category	Distance to shore range (km)
TE_low	TE 1	DC1	0 ~ 10
	TE 2	DC2	10 ~ 20
	TE 3	DC3	20 ~ 30
TE_middle	TE 4	DC4	30 ~ 40
	TE 5	DC5	40 ~ 50
	TE 6	DC6	50 ~ 60
	TE 7	DC7	60 ~ 70
TE_high	TE 8	Waster depth category	Water depth range (m)
	TE 9		
	TE 10	WD1	0 ~ 10
	TE 11	WD2	10 ~ 20
	TE 12	WD3	20 ~ 30
		WD4	30 ~ 40
		WD5	40 ~ 50

지형고도를 200m 간격의 12개 범주(TE1~TE12)로 구분하였다(Table 2). 이때 범주 구분은 선행연구에서 평원과 산지를 구분한 토지기복량(relief energy)을 참고하였다^[11]. 200m 간격으로 범주를 구분할 경우 남북한의 평균 해발고도(남한: 259m, 북한: 592m)를 기준으로 크게 세 구간으로 구별할 수 있다.

2.3 수심 및 이격거리

수심과 해안선 이격거리는 해상풍력의 수중기초(foundation)와 전력케이블 연결 등 비용의 절반 이상을 결정하는 중요한 요소이다. 한반도 주위의 수심은 대양수심도운영위원회(GGC)의 공간해상도 1km급 GEBCO 자료를 사용하였다.

유럽풍력협회(EWEA)의 해상풍력 보급통계와 고정식 해상기초로 한정하여 10m 간격으로 최대 50m까지 5개의 범주(WD1~WD5)로 구분하였다^[12]. 해상풍력단지는 운영과 유지보수의 효율을 고려하여 최대 해안선으로부터 70km 이내에 건설되므로 해안선 이격거리 상한은 70km로 설정하였다. 해안선 이격거리는 단순화된 해안선을 기준(면적 10km² 이하의 작은 섬 제외)으로 10km 간격으로 7개의 범주(DC1~DC7)로 구분하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1 육상 풍력자원 비교

Table 3은 남한과 북한의 육상 풍력자원을 비교한 것으로, 북한의 영토는 남한보다 20,330 km²(20%) 더 넓으며, 평균 해발고도 역시 약 2배 더 높다. 이는 북한이 평야보다 산지가 더 많이 분포하는 지형적 특징을 가지기 때문이다^[13].

Fig. 2는 200m 간격으로 구분된 지형고도 범주별 면적을 비교한 그래프로, 남북한의 지형적 특징의 차이를 잘 보여준다. 남한 육상의 경우 해발고도 200m 이하의 저지대(TE1)가 약 54,000km²로 남한 영토의 절반 이상을 차지하며, 1,000m 이상의 고지대는 1%에 불과하다. 반면 북한은 TE1 범주가 북한 영토의 약 31%로, 남한에 비해 상대적으로 고지대의 분포 비율이 더 크다.

남한은 해발고도가 증가함에 따라 면적이 급격히 줄어들지만(TE6는 영토의 1% 이하), 북한은 그 감소폭이 적다.

Table 3. Comparison of onshore wind resource

Topographic feature	South Korea	North Korea
Total land area	100,210 km ²	120,540 km ²
Mean terrain elevation	259 m	592 m
Mean wind power density	237 W/m ²	255 W/m ²
Maximum wind power density (location)	1469 W/m ² (38.1°N 128.4°E)	2155 W/m ² (41.7°N 129.2°E)
Feasible area for wind farm development	12,267 km ² (12%)	18,443 km ² (15%)
Mean terrain elevation in feasible area	493 m	942 m

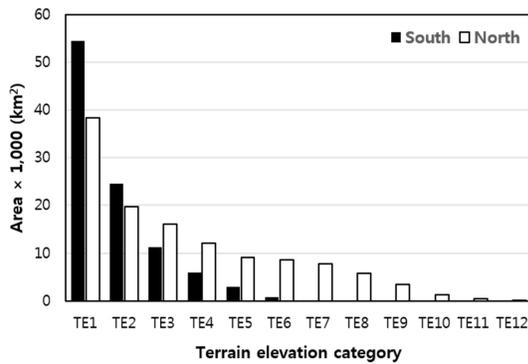


Fig. 2. Comparison of area by terrain elevation category

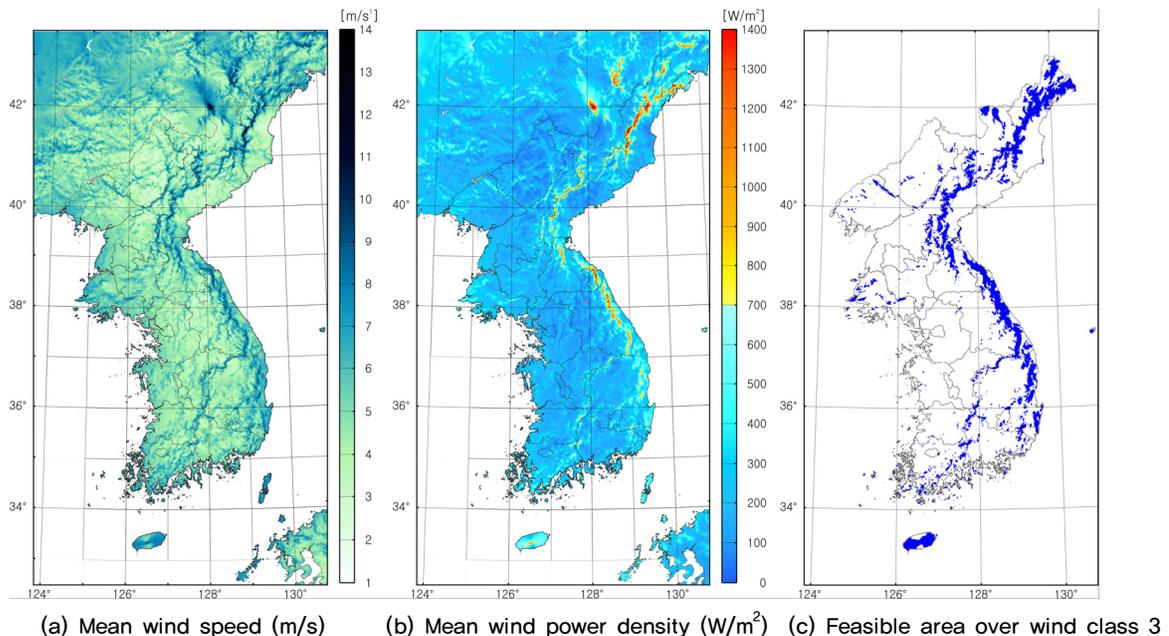


Fig. 3. Wind resource maps of the Korean Peninsular provided by KIER-WindMap (80 m above ground/sea level)

이는 높은 고원지대가 많이 분포하기 때문이다.

한반도의 육상 풍력자원은 주로 고산지대 능선을 따라서 형성된다(Fig. 3). 남북한 모두 1차 산맥인 백두대간을 따라 우수한 풍력자원이 분포하고 있으며, 특히 북한은 함경산맥을 따라 한반도 북동쪽 끝까지 탁월한 풍력자원이 분포한다. 고지대 비율이 높은 북한의 풍력밀도는 평균 255 W/m², 최대 2,155W/m²이며 남한은 북한보다 상대적으로 낮은 풍력밀도인 평균 237W/m², 최대 1,469W/m²이다. 북한의 평균 지형고도가 남한의 2배로 높음에도 불구하고 평균 풍력밀도는 불과 8% 정도 높기 때문에 북한의 육상 풍력자원이 남한보다 더 우수하다고 보기는 어렵다.

보다 객관적인 기준으로 남북한 육상 풍력자원을 비교하기 위해 최소한의 경제성이 확보되는 기준인 바람등급 3등급 이상인(지상 80m에서 평균 풍력밀도 380W/m² 이상) 면적을 비교하였다(Fig. 3(c); Table 3). 남북한의 3등급 이상인 면적은 각각 12,267km², 18,443km²로 북한이 남한보다 6,176km²(50%) 만큼 넓다. 즉, 북한에서 육상 풍력단지 개발이 가능한 면적은 남한의 1.5배이다. 단, 북한이 남한보다 영토면적이 1.2배 크기 때문에 이를 고려한다면 육상 풍력발전 가능지역은 30% 정도 더 유리하다고 볼 수 있다.

남한은 바람등급 3등급 이상인 지역이 태백산맥, 소백산맥과 및 동부 해안과 제주도에 위치하며, 북한은 낭림산맥,

함경산맥, 서해안 일부 지역에 위치한다. 이 지역들은 대부분 주요 산맥의 능선부로, 평균 해발고도가 남한은 493m, 북한은 942m이다. 즉, 북한의 풍력자원 개발가능 지역은 남한보다 해발고도가 약 450m 더 높은 곳에 위치한다. 참고로 저고도 지역(해안과 내륙평지)을 제외하면 평균 해발고도의 차이는 660m에 이른다.

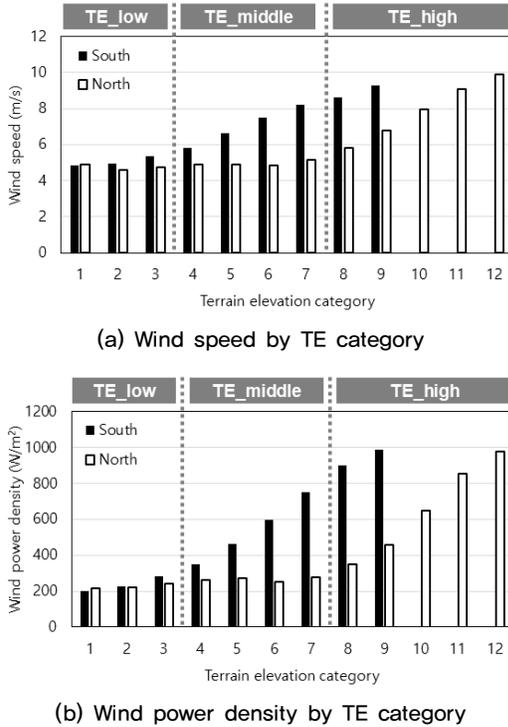


Fig. 4. Comparison of wind resource by TE category

지형고도 범주별 풍력자원의 분포특성을 비교한 Fig. 4를 보면, 남한은 TE 등급이 높아질수록 평균풍속과 풍력밀도가 꾸준히 증가하는 경향을 보이는 반면, 북한은 TE_low부터 TE_middle까지 풍력자원의 증가경향이 없다가 TE_high 구간에서 비로소 증가하는 특성을 보인다. 바람등급 관점에서 남한은 TE_middle부터 초과하는 반면, 북한은 TE_high부터 초과하는 경향을 보인다.

Fig. 5는 지형고도 범주별 풍력자원의 분포특성을 평균풍속별 면적으로 비교한 것으로, 저고도 범주인 TE_low에서는 남북한의 평균풍속별 면적이 유사한 반면, 중고도 범주인 TE_middle에서는 3m/s부터 7m/s까지의 풍속구간에서는 북한의 면적이 크게 나타난다. 고고도 범주인 TE_high에서는 주로 북한에만 풍력자원이 존재하는 것으로 분석된다.

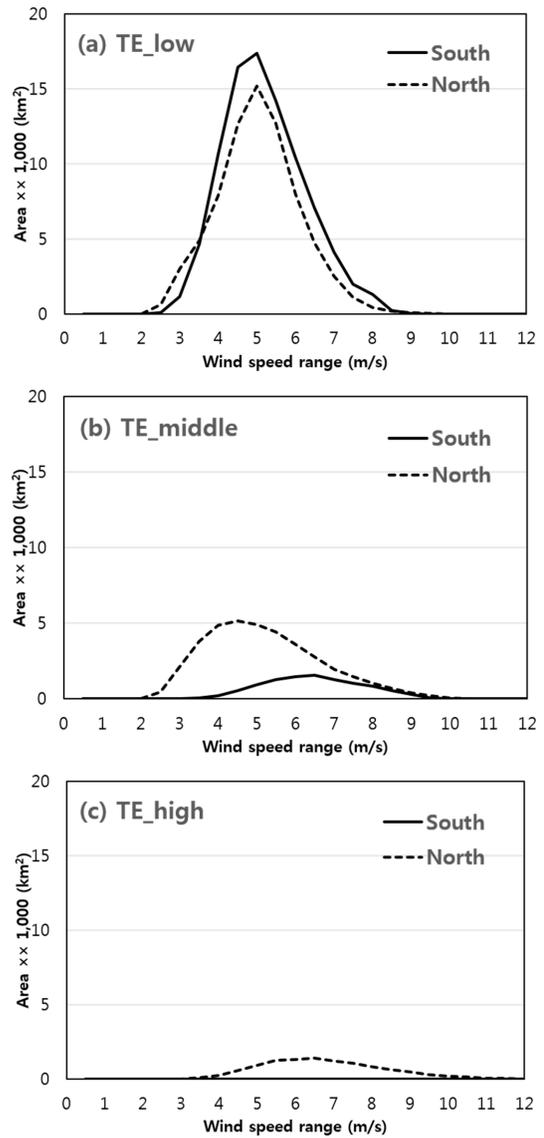


Fig. 5. Comparison of area by wind speed ranges for three sections

3.2 해상 풍력자원 비교

해안선을 기준으로 이격거리 70km 이내의 해상 총 면적은 남한 135,566km², 북한 59,663km²로 남한이 북한의 2.3배이다(Table 4). 수심 범주별 남북한 해상 면적은 모든 범주에 대해 남한이 북한보다 넓으며(Fig. 6), 수심 50m 이내 해상영역의 비율은 남북한이 각각 29%, 36%이다. 육상풍력은 바람등급 3등급을 경제성 판단 기준으로 하였으나 해상풍력은 해상구조 CAPEX 비용이 급증하므로 4등급(490W/m² 이상)을 기준으로 하였다.

해상기초 비용에 직접적인 영향을 미치는 수심과 전력계

통 연결거리를 결정하는 해안선 이격거리는 해상풍력사업의 초기 투자비(CAPEX)를 결정하는 중요한 인자이다. 해상 풍력자원의 분포 특성을 이해하기 쉽도록 Fig. 7과 같이 수심과 이격거리 평면상에 풍력밀도를 나타내었다.

Table 4. Comparison of offshore wind resources

Topographic feature	South	North
Area within 70 km from coastline	135,566 km ²	59,663 km ²
Mean water depth	402 m	842 m
Mean wind power density	510 W/m ²	484 W/m ²
Maximum wind power density (location)	715 W/m ² (33.0°N 128.4°E)	822 W/m ² (41.7°N 129.2°E)
Feasible area for wind farm development	2,953 km ² (2 %)	6,256 km ² (10 %)
Mean water depth in feasible area	37 m	34 m

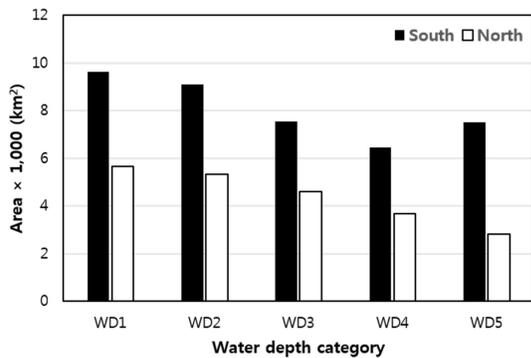


Fig. 6. Comparison of area by water depth category

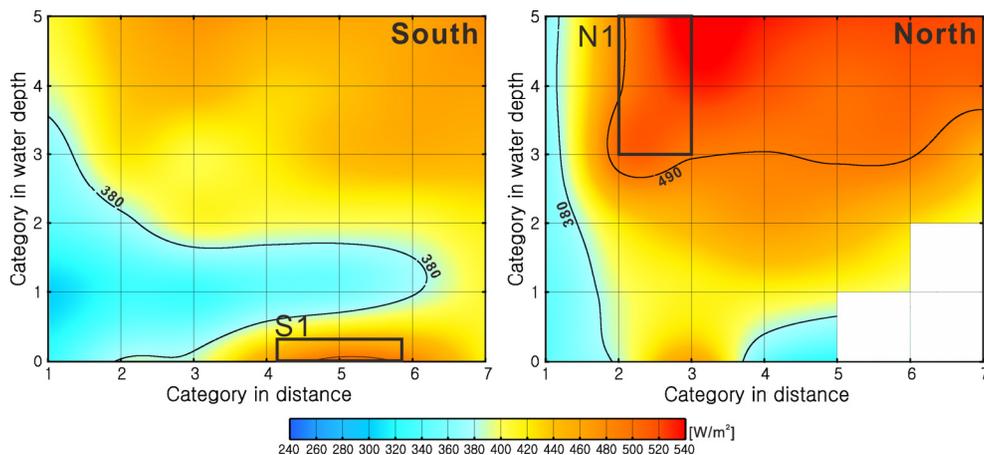


Fig. 7. Distribution of wind power density by water depth category and distance to shore category (left: South Korea, right: North Korea)

남북한 모두 해안에서 멀어질수록, 그리고 수심이 깊어질수록 풍력밀도가 증가하는 경향이 나타난다. 남한해상은 해안선으로부터의 이격거리가 멀고 수심이 얇은 지역에서 4등급 이상의 풍력밀도가 나타난다(S1). 반면 북한해상은 전반적으로 풍력밀도가 남한보다 높으며, 해안과 가깝고 수심이 깊은 지역(N1)에서 4등급 이상의 풍력밀도가 나타난다.

Fig. 8은 바람등급 4등급 이상인 후보지역(feasible area)

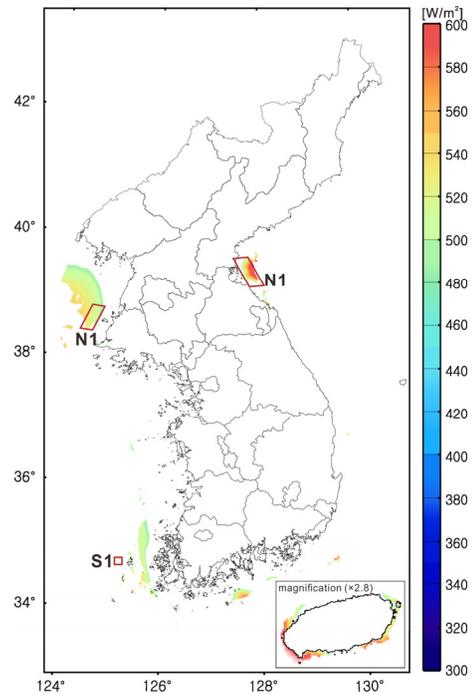


Fig. 8. Feasible areas for offshore wind farm development (wind class over 4, water depth within 50 m)

을 지도에 도시한 것이다. 남한은 제주도 연안, 서남해상(S1)이 후보지로 선별되었으며 북한은 평안도, 황해도, 강원도 해상(N1)이 유망할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 높은 정확도를 갖는 한반도 풍력자원지도를 이용하여 남북한의 육해상 풍력자원을 거시적으로 비교하였다. 특히 육상풍력은 지형고도 측면에서, 해상풍력은 수심과 해안선으로부터의 이격거리 측면에서 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 육상 풍력자원의 경우, 바람등급 3등급 이상인 면적은 남북한이 각각 12,267km², 18,443km²로 북한이 남한의 1.5배이다. 풍력자원이 우수한 지역은 남북한 모두 고지대 능선부이나 그 평균 해발고도가 남한은 660m임에 비해 북한은 그 2배로 높은 1,262m로, 진입도로 공사, 전력계통 연계 등을 고려할 때 남한에 비해 CAPEX가 높을 것으로 예상된다.
- 2) 해상 풍력자원의 경우, 바람등급 4등급 이상, 수심 50m 이하, 해안선으로부터 이격거리 70km 이내인 조건을 만족하는 개발가능 해상면적은 남북한이 각각 2,953km², 6,256km²로 북한이 남한의 2.1배이다. 특히 북한 강원도 해상은 비교적 짧은 전력선 연계 거리에 높은 풍력밀도 영역이 분포하고 있어 추후 보다 정밀한 풍력자원평가를 통해 개발가능성을 판단할 필요가 있다고 사료된다.
- 3) 본 연구에서는 거시적인 관점에서 남북한의 풍력자원 잠재량을 분석하였으나, 향후 실질적인 풍력발전사업으로 이행되기 위해서는 먼저 북한지역에 대한 풍력자원지도의 검증이 필요하며, 그 다음으로 해상풍력 발전에서 중요한 요인인 해상기초, 환경규제 등의 세부적인 제약조건을 포함한 잠재량 평가가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B9-2414)으로 수행한 연구결과입니다.

References

- [1] Kim, Y.S., Yun, S.K., Lee, S.H., 2018, "Small scale renewable energy development as a strategy for Inter-Korean cooperation", *Environmental Law and Policy*, **21**, 131-165.
- [2] Bing, H.J., Lee, S.K., 2017, "Renewable energy in North Korea: Current status and implications", *Korea Institute for Industrial Economics & Trade: Korea, Policy Doc.* 2017-295.
- [3] Kim, H.G., Jang, M.S., Lee, E.J., 2008, "Meteor-statistical analysis for establishment of Jeju wind resource database", *J. Environ. Sci.*, **17**(6), 591-599.
- [4] Kim, H.G., Kang, Y.H., 2012, "The 2010 Wind resource map of the Korean Peninsular", *J. Wind Eng. Inst. Korea*, **16**(4), 167-172.
- [5] Seo, E.K., Yun, J.H., Park, Y.S., 2009, "A 30-year average wind map in North Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **30**(7), 845-854.
- [6] Yun, J.H., Seo, E.K., Park, Y.S., Kim, H.S., 2010, "An analysis of wind energy resources using synoptic observational data in North Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **31**(3), 225-233.
- [7] Kim, H.G., Lee, H.W., Lee, S.H., 2011, "Development of the Korea wind resource map and suitability assessment system for offshore wind farm", *J. of Wind Energy*, **2**(2), 17-23.
- [8] Kim, H.G., Kang, Y.H., Kim, C.K., 2017, "Analysis on of Wind Energy Status and Capacity Factor of South Korea by EPSIS Wind Power Generation Data", *J. of Wind Energy*, **8**(2), 21-27.
- [9] Kim, H.G., Hwang, H.J., Kang, Y.H., Yun, C.Y., 2013, "Comparison of offshore wind retrieval software from SAR satellite imagery", *New. Renew. Energy*, **9**(3), 14-19.
- [10] Kim, H.G., Hwang, H.J., 2010, "Review on wind mapping

- service of wind resource consulting companies”, *New. Renew. Energy*, **6**(2), 12-18.
- [11] Lee, M.B., Kim, N.S., Choe, H.S., 2004, “Geomorphic analysis of the North Korea using digital elevation model”, *J. of the Korean Geomorphological Association*, **11**(1), 53-63.
- [12] Wind Europe, 2018, *The European offshore wind industry —Key trends and statistics 2017*, Wind Europe: Brussels, Belgium.
- [13] Tak, H.M., Kim, S.H., Son, I., 2013, “A study on distribution and spatial properties of geomorphological mountain area”, *J. of the Korean Geographical Society*, **48**(1), 1-18.