

# 미래 표준 풍력터빈 기술 전망

김진영<sup>1†</sup> · 김현구<sup>2</sup> · 김건훈<sup>3</sup> · 황수진<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 신재생자원지도연구실, 선임기술원

<sup>2</sup>한국에너지기술연구원 신재생자원지도연구실, 실장

<sup>3</sup>한국에너지기술연구원 신재생자원지도연구실, 책임연구원

<sup>4</sup>한국에너지기술연구원 신재생자원지도연구실, 박사후연구원

## Projection of General Wind Turbine Technology in Future

Kim Jin-Young<sup>1†</sup> · Kim Hyun-Goo<sup>2</sup> · Kim Keunhoon<sup>3</sup> · Hwang Su-Jin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Senior Engineer, Korea Institute of Energy Research New and Renewable Resource Map Laboratory

<sup>2</sup>Chief, Korea Institute of Energy Research New and Renewable Resource Map Laboratory

<sup>3</sup>Principal Researcher, Korea Institute of Energy Research New and Renewable Resource Map Laboratory

<sup>4</sup>Postdoctoral Researcher, Korea Institute of Energy Research New and Renewable Resource Map Laboratory

†Corresponding author: jinyoung.kim@kier.re.kr

### Abstract

To be feasible, a master plan for renewable energy development should be based on reliable resource assessments. In particular, to reach carbon neutrality, long-term renewable energy potential prospects by 2050 are required. Such assessment is key to establish a future resource model by defining a proper future prospect scenario with regard to the potential determinants of future potential prospects. As part of developing future wind resource potential models, this paper describes technology scenarios deduced by statistical analysis of domestic onshore wind farm data. The rated power of the standard wind turbine was defined as 5.5, 4, and 8 MW in the moderate, conservative, and advanced scenarios, respectively. The turbine diameter, hub height, and specific power of each scenario were determined according to IEC wind classes. The results of this study are in accordance with the wind power outlooks of the USA and Europe, and are expected to be utilized as a basic reference to estimate realistic onshore wind future potentials.

**Keywords:** 미래 풍력(Future wind energy), 풍력 보급(Wind deployment), 풍력터빈(Wind turbine), 가용 자원구간(Available wind resource zone), IEC 풍력터빈 등급(IEC classification of wind turbine, IEC wind class), 풍력 단지 데이터(Wind farm data)

### 1. 서론

재생에너지 자원 잠재량은 우리나라 전 지역에 걸친 자원의 총량을 가늠하기 위한 자료로, 에너지 기본계획 및 전력수급기본계획 등 정책적, 기술적 중장기 목표를 수립하는 데 사용되는 핵심 데이터이다<sup>1,2)</sup>. 잠재량 데이터는 3차 에너지기본계획(2019 ~ 2040), 5차 신재생에너지 기본계획(2020 ~ 2034), 9차 전력수급계획(2020 ~ 2034)에 실질적으

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.42, No.3, pp.63-71, June 2022  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.3.063>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 12 April 2022

Revised: 29 April 2022

Accepted: 2 May 2022

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 활용되었고, 지역에너지계획 수립에 직·간접적으로 활용되고 있다<sup>3)</sup>.

재생에너지 자원 잠재량은 기준에 따라 이론적 잠재량, 기술적 잠재량, 그리고 시장잠재량으로 분류되며, 단계별 다중기준의 의사결정모델(multicriteria decision-making model)에 의해 산정된다<sup>4)</sup>. 이를 이용한 풍력자원 잠재량 정의와 다중기준은 Table 1과 같다. 풍력잠재량 산정은 Table 1에서 제시된 바와 같이 가장 먼저 설비규모를 선정 하는 데에서부터 시작된다. 그리고 단계별 풍력자원 잠재량의 가정과 결과는 산학연 전문위원회에 의해 신중하게 검토되어 확정된다.

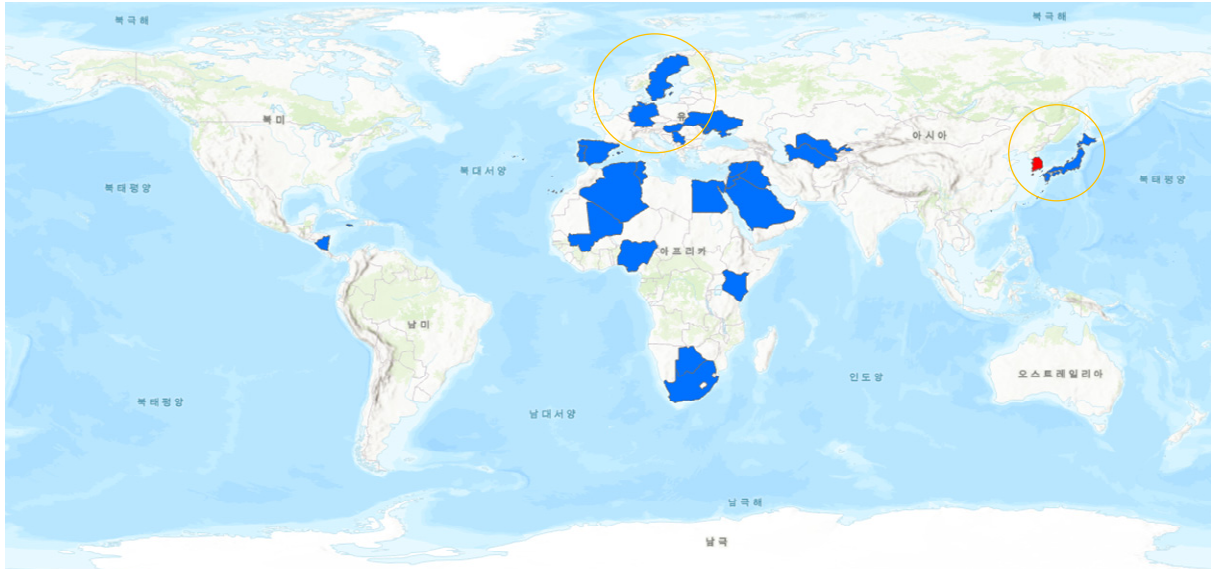
**Table 1** Definition and criteria of wind resource potential<sup>1)</sup>

Category	Definition	Multicriteria
Theoretical potential	Amount of wind power in installed capacity and power generation with assumed capacity density of 5 MW/km <sup>2</sup>	<u>Turbine capacity</u> , capacity density, capacity factor
Technical potential	Amount of wind power in installed capacity and power generation, which is excluded geographical unusable areas and reflected technical constraints	Geographical constraints (waterbody, wetlands, steep slope, and landslide hazard area) Technical losses
Market potential	Amount of wind power in installed capacity and power generation, which is additionally excluding environmental conservation areas and reflecting government support and market constraints	Market constraints (levelized cost of energy < system marginal price + renewable energy certificate) Regulatory constraints <sup>3)</sup>

지금까지 잠재량은 활용되는 정부정책 수립의 대상기간이 20년 내외인 것과 풍력터빈 운영수명의 20년 사이클을 커버함을 감안하여 장기간에 걸친 과거 데이터에 기초하여 산출하고 있다. 따라서 검증 기술에 기초한 특정설비를 기준가정으로 단일 규격에 대한 풍력자원의 분석범위를 제한해왔다. 그러나 풍력터빈은 등급에 따라 활용 자원량과 그에 따른 생산량이 달라질 수 있으며 풍력최근 중장기 로드맵의 대상기간이 21세기 중반, 즉 2050년까지 확대됨에 따라 핵심기술의 변화와 정책변화를 충분히 고려하여 업데이트 되어야 하는 실정이다<sup>5)</sup>. IRENA는 2018년 현재 2.6 MW 육상풍력터빈이 2025년에 4 ~ 5 MW로 커질 것으로 전망한 바 있다<sup>6)</sup>. 국내 풍력시장은 해외시장에 비해 시장규모와 환경적 보급여건의 다를 수 있으므로 국내외 자료를 종합적으로 비교할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 미래(2050년) 잠재량 산정을 위해 국내외 현재 보급된 기술 통계를 조사 분석하여 국내의 미래 표준 풍력터빈 기술을 새롭게 제안하고자 한다.

## 2. 분석 자료

미래 표준 풍력 기술은 국내외 실제 보급되거나 현재 계획된 풍력발전단지 통계자료를 조사 분석하였다. 특히 국외 풍력터빈기술은 풍력자원과 정책 환경에 따라 보급되는 터빈기술이 다를 수 있기 때문에 국내 풍력자원과 풍력 용량밀도가 유사한 해외 국가를 선정하여 자료를 분석하였다. Fig. 1은 ERA5 (the fifth generation of ECMWF atmospheric Re-Analysis)의 2000~2021년 동안 100 m 풍속 데이터의 도 단위 통계<sup>7)</sup>와 GWA



**Fig. 1** Distribution of similar wind speed and complexity areas over the 21 years (2000~2021). Yellow circles represent selected international country in this study

**Table 2** Main national wind installed capacity and capacity density

Nations	Total installations 2020 (MW)	Capacity density (MW/km <sup>2</sup> )
South Korea	1,515	0.015
USA	122,275	0.013
Canada	13,577	0.004
Brazil	17,750	0.002
Mexico	6,789	0.003
Argentina	2,618	0.001
Chile	2,829	0.004
Egypt	1,645	0.001
Kenya	338	0.001
South Africa	2,465	0.002
China	278,324	0.029
India	38,625	0.012
Australia	7,296	0.001
Pakistan	1,287	0.001
Japan	4,373	0.012
Vetnam	513	0.002
Philippines	427	0.001
Thailand	1,538	0.003
Germany	55,122	0.154
France	17,946	0.028
Sweden	9,811	0.022
Unite Kingdom	13,731	0.057
Turkey	9,280	0.012

(Global Wind Atlas)의 지형 복잡성(RIX, Ruggedness IndeX)<sup>8)</sup>을 활용하여 국내의 바람환경을 비교한 결과이다. 그리고 Table 2는 세계풍력협회(GWEC, Global Wind Energy Council)가 보고한 국가별 풍력보급실적과 국가별 조사면적으로 설비밀도를 연산한 결과이다<sup>9)</sup>. 우리나라는 풍속 3.91 ~ 6.09 m/s (평균풍속 4.5 m/s ± 지역별 편차)범위로 바람이 유사하고 지형의 복잡성 특성이 유사한 국가들은 유럽과 아프리카에 다수 있으며, 아시아는 일본이 포함되었다. 이들 중에서 우리나라와 설비밀도가 유사하거나 많은 국가는 독일, 스웨덴, 그리고 일본이었다. 이들 국가는 국외 풍력터빈 보급 기종의 범위와 추세를 국내와 상대적으로 비교하기 위해 대표 국가로 선정된 것임을 밝힌다.

국내 풍력터빈 정보는 풍력산업협회와 한국에너지공단의 통계 기록물을 통해 2000년 이후의 보급 용량, 설치 위치 정보를 포함한다<sup>10,11)</sup>. 실제 풍력발전단지 설문조사, 문헌조사, 그리고 상용 풍력발전단지 데이터<sup>12)</sup>를 통해 터빈직경과 허브높이 등의 설계변수를 추가 조사하여 포함하였다. 국내 풍력터빈은 기존 보급량 외에 발전사업 허가 후 환경영향평가 및 산지 이용협약이 완료된 계획단지도 고려하였다. 국외 풍력터빈 정보의 경우, 독일, 스웨덴, 그리고 일본의 풍력터빈 정보는 동일한 기간에 대해 국외 상용 풍력발전단지 데이터<sup>11)</sup>와 온라인 검색조사를 활용하여 포함하였다.

### 3. 보급 시나리오 개발

미래 풍력터빈 보급 시나리오는 Fig. 2에서 제시된 바와 같이 2021년 국외 터빈<sup>11)</sup>의 상위 25%중 65%를 차지하는 터빈을 보수적인 시나리오, 30%를 차지하는 터빈을 보통 시나리오, 그리고 나머지 5%를 차지하는 터빈을 진보적인 시나리오로 분류하였다. 풍력 터빈의 등급별 외형은 과거 2000 ~ 2021년간 보급된 국내 풍력터빈<sup>10,11)</sup>의 일반화된 외형 추세를 분석하여 반영하였다.

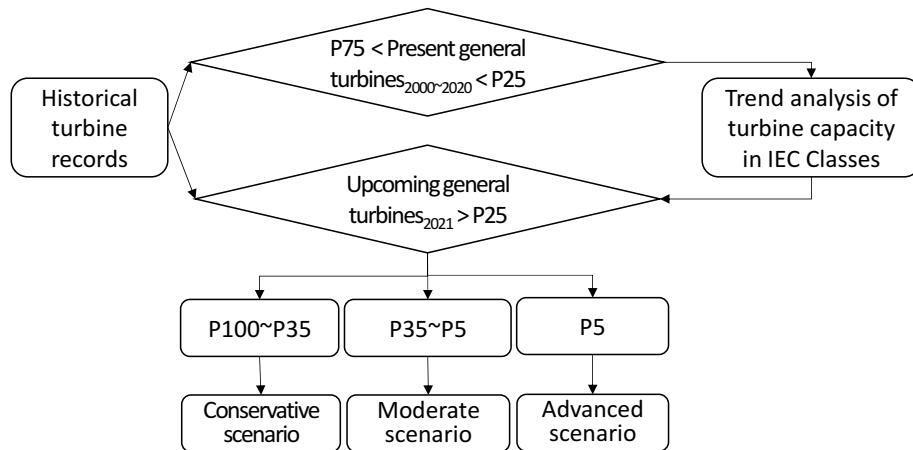


Fig. 2 Development flowchart of future wind turbine capacity

#### 4. 결과 및 토의

Fig. 3은 국내외 풍력터빈은 연도별 보급 현황이다. 국내외 그래프의 선은 50% 풍력터빈(표준 풍력터빈)의 평균 용량을 제시한 것이고 채색구간은 상위 25%와 하위 25% 풍력터빈 용량을 나타낸다. 우리나라는 보급기종의 용량 범위가 상대적으로 넓지만 국외 풍력터빈 보급 용량의 추세를 따라 점진적 증가추세에 있음을 확인할 수 있다. 국내 풍력터빈은 표준 풍력터빈은 2010 ~ 2011년을 기점으로 2 MW이 표준이 되었고 이는 2.181%년까지 유지되었다. 이후 표준 풍력터빈은 2018 ~ 2019년을 기점으로 2 MW급에서 3 MW급으로 표준 풍력터빈의 대형화가 이루어지자 곧 이어 해외 풍력터빈 기술수준과 유사하게 4 MW 급 풍력터빈 보급이 최근에 이루어진 것으로 나타났다. 풍력터빈 대형화 및 대형 풍력터빈의 보급 가속화가 정부정책과 국내 풍력터빈 제조기술력에 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 한편 국외의 표준 풍력터빈은 1 ~ 2 MW급까지 점진적으로 증가 추세에 있다가 2016 ~ 2020년까지 3 MW급 풍력터빈에서 정체해 있다가 최근 4 MW급 풍력터빈이 보급되기 시작했다. 우리나라는 풍력보급 시장이 작아서 국외 표준 풍력터빈 대형화에 비해 대형 풍력터빈 개발 및 보급 정체기간이 긴 것을 알 수 있다. 이를 감안하면 2050년 표준 풍력터빈은 최신 개발 터빈이나 개발 중인 터빈이 될 것으로 보인다.

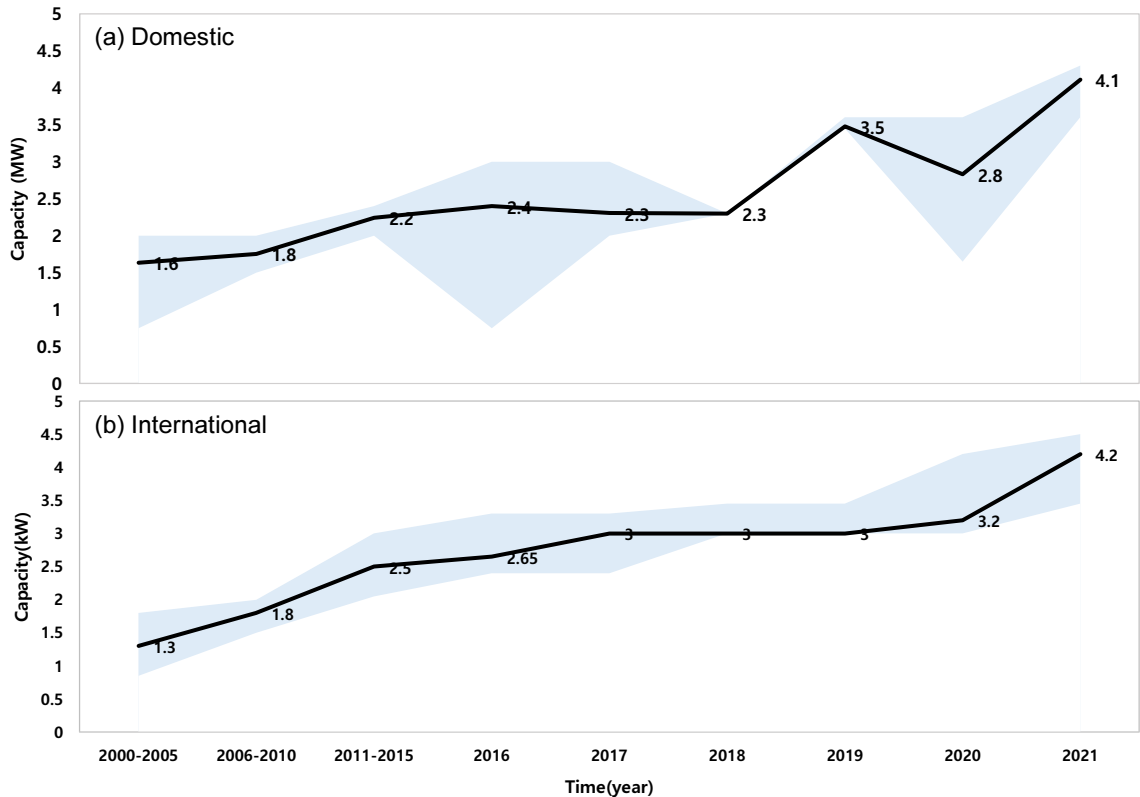
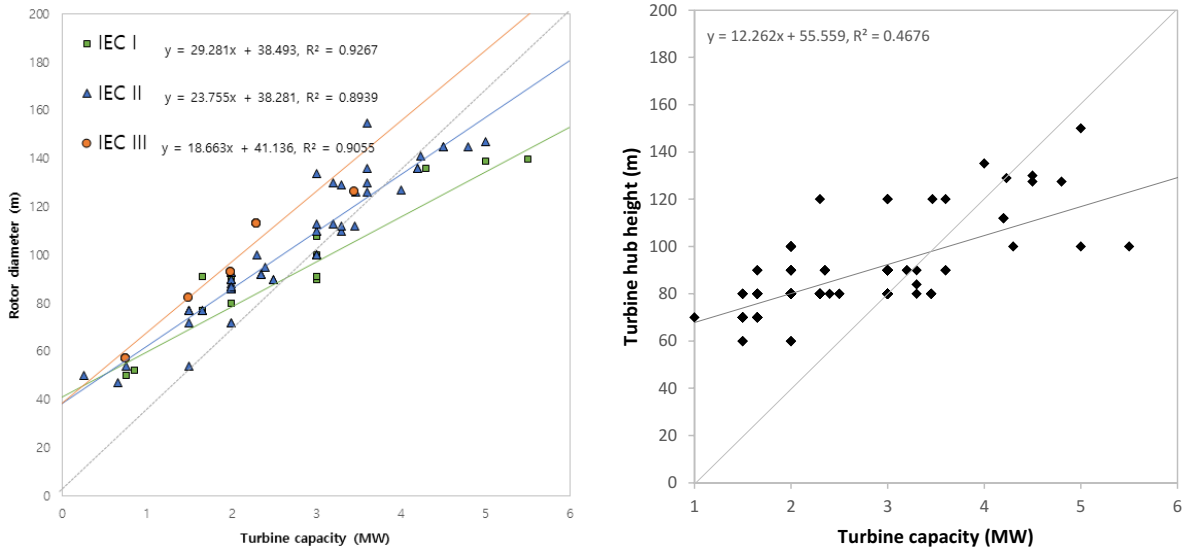


Fig. 3 Historical values based on domestic<sup>7)</sup> and international<sup>8)</sup> nameplate capacity

풍력터빈은 IEC 국제 표준에 따라 풍환경에 따른 터빈의 내구성을 고려하여 다시 세분류된다<sup>12)</sup>. 국내 풍력발전 터빈의 등급을 Table 3에서 제시하였다. 우리나라 전체 풍력터빈의 30 ~ 40%가 IEC I, II 등급이었는데 최근에는 40% 정도가 각각 IEC II, III 등급이었다. 이는 상대적으로 고풍속 지역을 대상으로 우선 개발되었던 IEC I 등급의 풍력터빈 보급이 최근 저풍속 지역에 맞는 IEC II, III 등급이 보급되기 시작한 결과라 하겠다. 풍력 등급에 따라 풍력터빈은 다수의 설계변수가 다르게 반영되지만 외형적으로 활용하는 자원의 구간이 크게 달라진다. 2050년에는 IEC I, II, 그리고 III 등급의 모든 풍력터빈을 분류하여 가용한 자원의 구간을 구분하는 것이 바람직한 것으로 보인다. Fig. 4는 미래 풍력 터빈의 용량별 설계변수를 함수화한 결과이다. 왼쪽 그림은 IEC 풍력터빈 등급별 터빈용량에 대한 회전자 직경의 산포도이고 오른쪽 그림은 터빈 용량에 따른 허브높이 산포도이다. IEC 풍력터빈 등급별 터빈용량-회전자 직경 함수의 추정 수준은 결정계수 0.9 정도였다. 한편 IEC 풍력터빈 등급별 터빈용량-허브높이 함수의 추정은 0.1 ~ 0.7로 편차가 크게 나타났다(제시하지 않음). 본 연구에서 터빈용량-허브높이의 경우 Fig. 4의 오른쪽 그림에 제시된 바와 같이 결정계수 0.5 수준의 단순 용량의 선형함수로 제시하였다. 따라서 대형화에 따라 회전자 직경은 IEC 풍력터빈 등급별로 뚜렷한 차이를 보이는 반면 현재 보급된 터빈의 대형화에 따른 허브 높이는 단순히 대형화 용량에 따라 허브높이가 커지는 것만 확인할 수 있었다.

**Table 3** Percentage of installed turbines in IEC classification of wind turbine and wind classes

Category	IEC I high winds	IEC II medium wind	IEC III low wind
Total	30.4%	43.4%	26.1%
Latest years	22.3%	39.6%	38.1%



**Fig. 4** Relationship of rotor diameter (left) and hub height (right) against turbine capacity

지금까지 국내외 풍력터빈 조사 결과를 통해, 2050년 미래 풍력터빈 기술을 Table 4와 같이 제안하고자 한다. 2050년 미래 풍력터빈은 현재 최근 보급중이거나 개발 중인 국내 풍력터빈을 종합 비교하여 시나리오로 개발하였다. 국외 터빈의 상위 25%중 보통 시나리오는 6 MW급 터빈이었고 우리나라에서 개발 중인 5.5 MW를 제안한다. 이보다 보수적인 시나리오에는 4 MW급 터빈을, 그리고 이보다 진보적인 시나리오에는 8 MW급 터빈을 고려하여 제안한다. 이들 용량에 실제 우리나라 개발에서 개발 중인 국내터빈용량을 기준으로 제시하였다. 시나리오별 각 풍력터빈이 활용하는 자원을 활용할 수 있는 구간은 Fig. 4에서 도출된 추정식에 근거하여 허브높이 100 m, 120 m, 150 m를 일반적인 높이로 제시하였다. 회전자 직경은 시나리오별로 115 ~ 146 m, 142 ~ 184 m, 188 ~ 246 m 직경을 커버하는 구간일 것으로 본다. 현재 국내 A사의 4.3 MW 풍력터빈의 허브높이 5 m, 회전자 직경이 -5 ~ -21 m, 국내 B사의 5.5 MW 풍력터빈의 허브높이 4 m, 회전자 직경이 2 m, 그리고 국내 B사의 8 MW 풍력터빈의 허브높이 20 m, 회전자 직경 -17 m인 것을 감안하면 일반화한 함수기에 의해 추정된 구간이 상당히 유사한 것으로 나타났다.

**Table 4** Future general wind turbine technology

Category	Conservative			Moderate			Advanced		
	IEC I	IEC II	IEC III	IEC I	IEC II	IEC III	IEC I	IEC II	IEC III
Turbine rating (MW)	4			5.5			8		
Hub height (m)	100			120			150		
Rotor diameter (m)	115	128	146	142	160	184	188	214	246
Specific power (kW/m <sup>2</sup> )	0.38	0.31	0.24	0.35	0.27	0.21	0.28	0.22	0.17

## 5. 결론

본 연구에서 국내외 설문조사, 문헌조사, 그리고 상용데이터를 통합 분석하여 현재 보급된 풍력터빈 위치정보, 용량, 직경, 허브 높이, 그리고 IEC등급을 정보화하고, 2050년 미래 풍력터빈 기술을 제안하였다. 이때 국외 풍력터빈기술은 풍향과 보급률이 유사한 독일, 스웨덴 그리고 일본의 통계자료를 활용하여 분석하였다. 미래 풍력터빈용량-회전자 직경, 풍력터빈용량-허브높이를 선형함수로 일반화하여 추정식에 기반하여 미래 보급 가능한 표준 풍력터빈의 시나리오를 제시하였다. 기존 풍력잠재량 산정<sup>1,2,3</sup>에 활용된 표준 풍력터빈 기술과 비교한 결과는 다음과 같다.

- (1) 미래 표준풍력터빈기술은 시나리오별로 4 ~ 8 MW를 제안하였다. 국외 최근 보급 터빈 용량 및 국내 제조기술 유무를 고려하여 보수적인 시나리오, 보통 시나리오, 진보적인 시나리오로 분류하였다. 각각의 시나리오에 해당하는 터빈용량은 국제 제조기술을 반영하여 4 MW, 5.5 MW, 그리고 8 MW를 제시하였

다. 현재 풍력터빈이 2018년 기준 2.3 MW보다 1.7 ~ 3.5배 증가한 용량이다. 이들은 미국의 2030년 보급 시나리오에서 제시된 4 ~ 7 MW<sup>13)</sup>와 유럽의 2050년 보급 시나리오 기준 4.5 MW<sup>14)</sup>의 유사한 범위를 포함하는 것으로 나타났다.

- (2) 시나리오별 풍력터빈은 일반화된 IEC 풍력터빈 등급별 터빈외형으로 규격화하였다. 즉 기존 풍력기술은 고려한 특정 풍력터빈의 특정 풍력터빈 기종의 허브높이와 회전자 직경을 제한하여 활용된 반면 미래 표준 풍력기술은 터빈용량의 대형화에 따라 달라지는 허브높이와 풍력등급별 회전자 직경을 일반화하여 제시하였다. 표준 풍력터빈의 일반적 활용 가능한 자원의 구간은 시나리오별로 각각 허브높이 100 m, 120 m, 150 m를 중심으로 115 ~ 146 m, 142 ~ 184 m, 188 ~ 246 m 회전자 직경을 커버하는 구간일 것으로 본다. 일반화된 풍력터빈과 유사한 국내 특정터빈을 비교한 결과 허브높이 5 ~ 20 m, 회전자 직경이 -21 ~ 2 m의 근소한 차이가 있는 것으로 나타났다. 그리고 현재 풍력터빈이 2018년 기준 2.3 MW의 허브높이 83.5 m가 1.2 ~ 1.8배 정도 커지고, 회전자 직경은 113 m은 비슷하거나 2배 정도 커지는 것으로 전망되었다.

육상 풍력터빈의 대형화 및 보급은 수십 년의 기술 및 단지개발의 노력이 반영되어야 함을 확인할 수 있었다. 미래 풍력터빈의 2050년까지의 실질적인 기술개발 속도에 따라 달라질 수 있으나, 기존의 없었던 미래 풍력터빈 기술의 가용한 자원의 구간을 시나리오별 설계변수로 전망한 것은 새로운 연구 성과라 하겠다. 물론 이 연구 결과는 학술적으로 가능한 시나리오를 제시한 것이며, 추후 실제 우리나라 잠재량 산정에 수용 가능한 기준은 이를 바탕으로 풍력전문위원회의 신중한 검토를 통해 확정되어야 할 것으로 보인다. 확정된 표준풍력터빈은 시장환경의 입지여건을 고려하여 시간에 따른 터빈모델을 반영하여 용량밀도 및 발전환산 잠재량 산정에 활용될 예정이다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 202113020020010).

## REFERENCES

1. Korea Institute of Energy Research, New-Renewable Energy Resource Map Upgrade and Market Potential Analysis, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017.
2. Korea Energy Agency, New and Renewable Energy White Paper, 2020. last accessed on the 11<sup>th</sup> April 2022.
3. Kim, J.-Y., Kang, Y.-H., Cho, S., Yun, C., Kim, C. K., Kim, H.-Y., Lee, S. M., and Kim, H.-G., Assessment of Energy Self-sufficiency Ratio Based on Renewable Market Potentials for Unit of Local Government, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 39, No. 6, pp. 137-151, 2019.
4. Kim, J.-Y., Kim, C. K., Yun, C.-Y., Kim, H.-G., and Kang, Y.-H., Assessment of Techno-economic Potentials for Solar Thermal Energy in South Korea, AIP Conference Proceedings, Vol. 2126, No. 190008, pp. 1-5, 2019.
5. Katsigiannis, Y. A., Stavrakakis, G. S., and Pharconides, C., Effect of Wind Turbine Classes on the Electricity



- Production of Wind Farms in Cyprus Island, Conference Papers in Science, Vol. 2013, No. 750958, pp. 1-6, 2013.
6. IRENA, Future of Wind: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-economic Aspects, pp. 88, 2019.
  7. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G.D., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, T., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, O., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.N., The ERA5 Global Reanalysis, Quarterly J. of the Royal Meteorological Society, Vol. 146, No. 730, pp. 1999-2049, 2020, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
  8. Global Wind Atlas, 2021. <https://globalwindatlas.info>. last accessed on the 11<sup>th</sup> April 2022.
  9. Global Wind Energy Council, Global Wind Report, 2021. <https://gwec.net>. last accessed on the 11<sup>th</sup> April 2022.
  10. Korea Wind Energy Industry Association, 2020 Annual Report on Wind Energy Industry in Korea, 2020. last accessed on the 11<sup>th</sup> April 2022.
  11. Public Data Portal, Korea Energy Agency-Wind farm location information, 2021. <https://data.go.kr> last accessed on the 11<sup>th</sup> April 2022.
  12. Wind Energy Database. 2022. <https://thewindpower.net>. last accessed on the 11<sup>th</sup> April 2022.
  13. NREL, ATB Data for Technologies, 2021. <https://atb.nrel.gov> last accessed on the 26<sup>th</sup> April 2022.
  14. Enevoldsen, P., Permien, F.-H., Bakhtaoui, I.e., von Krauland, A.-K., Jacobson, M. Z., Xydis, G., Sovacool, B. K., Valentine, S. V., Luecht, D., and Oxley, G., How Much Wind Power Potential Does Europe Have? Examining European Wind Power Potential with an Enhanced Socio-technical Atlas, Vol. 132, pp. 1092-1100, 2019.