

부유식 해상풍력발전

신현경

울산대학교 부유식해상풍력학과

1. 서론

부유식 해상풍력발전시스템은 발전기의 하부 구조물이 해저면에 고정되어 있지 않고 부력을 이용한 부유식 구조물에 의해 해상에 떠 있는 형태이며, 연안으로부터 원거리에 부유식 구조물이 위치함으로써 육상 또는 고정식 풍력발전에 비해 더 우수한 풍황 자원을 이용할 수 있고, 소음 및 전자기 등의 영향이 작은 장점이 있다.

특히, 경쟁력 있는 육상풍력 단지의 고갈, 부지사용에 대한 거주환경 및 민원문제의 증가 등 개발에 가장 난해한 현실적 문제로부터 상대적으로 자유로운 해상풍력발전에 대한 수요가 증가하고 있으며, 수심 50 m 이하의 고정식 해상풍력발전시스템이 현재 주류를 이루고 있으나, 2020년 이후 중수심(수심 50 m~150 m해역) 설치형 부유식 해상풍력발전시스템에 대한 수요가 증가할 것으로 예상된다.

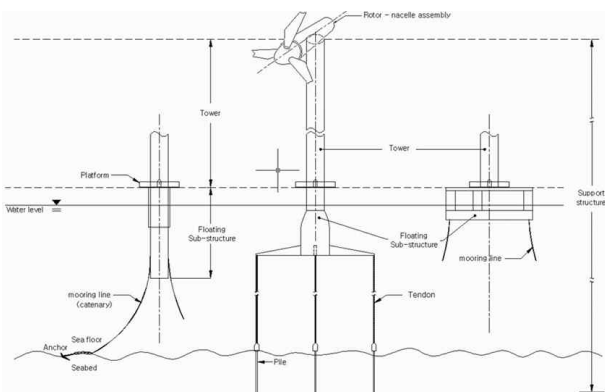


그림 1. 부유식 해상풍력발전시스템의 요소.
(좌로부터 원통식, 인장계류식, 반잠수식)
출처 : IEC TS 61400-3-2, 2019

부유식 해상풍력발전 분야는 노르웨이, 프랑스, 영국, 미국, 일본과 한국 등을 중심으로 활발한 연구 및 실증이 진행되고 있지만, 아직 기술개발 단계이므로 국내의 대형 조선 및

해양플랜트 기술력을 접목하여 기술 개발을 시도한다면, 단기간 내 세계 정상급 기술을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

국내 해상환경에서는 년 10 분 평균풍속 8.0 m/s 이상의 고품질 풍황을 갖는 해역의 수심은 대부분 50 m 이상이 되고, 이 해역에는 고정식 보다는 주로 부유식 해상풍력발전시스템이 설치되는 추세가 될 것이다. 수심 제약 조건으로부터 자유로운 부유식 해상풍력발전의 경우에는 풍황이 풍부한 동해의 울산과 부산, 남해안 일대, 제주 해역이 적합한 것으로 조사되고 있으며, 이 해역에 약 16,000 MW 이상의 시장 확보가 가능하고, 내수시장뿐만 아니라 해외시장 진출이 가능한 것으로 조사되어 부유식 해상풍력의 적극적인 개발과 확산이 필요하다.



그림 2. 부유식 해상풍력발전시스템의 부유체 주요 형식.

출처 : Illustration by Joshua Bauer, National Renewable Energy Laboratory (US Department of Energy)

부유식 해상풍력발전시스템의 주요 형식은 시스템 안정성 유지방법과 설치 수심에 따라 반잠수식 (Semi-Submersible), 원통식 (Spar Buoy), 인장계류식 (TLP, Tension Leg Platform) 등으로 분류된다. (그림 1, 그림 2)

원통형 해상풍력발전시스템은 해상운전 중 안정성을 유지하기 위해 흘수(Draft)를 깊게 적용하여 안정성을 확보하는 형식이며, TLP 형식은 계류용 줄(Mooring Line)의 장력을 이용하며, 반잠수식은 부유체의 부력과 계류 시스템을 이용한 형식으로 시스템 안정성을 유지하는 방식이다.

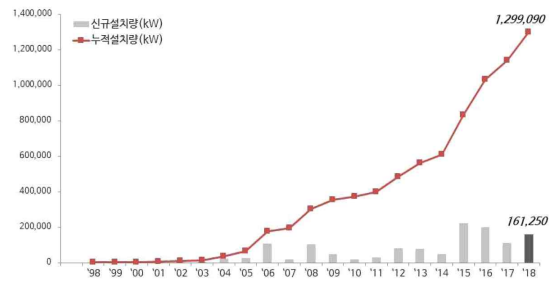
반잠수식 형식은 조선소 및 연안 부둣가에서 제작/조립 후에 예인선을 이용하여 운송이 가능하고, 설치 수심 또한 50 m~150 m 범위에서 적용하기 용이한 형식으로서 최근 개발되는 부유식 해상풍력발전시스템의 부유체로 채택되고 있다.

2. 국내 · 외 관련 사업 현황

2.1 국내 현황

2017년 12월 문재인 대통령은 신재생에너지 비율을 2030년까지 20%까지 높이겠다는 '신재생에너지 3020 전략'을 발표하였다. 2030년까지 53 GW의 신재생에너지를 신규 설치하고, 신규 설치량 중에서 풍력과 태양광의 비중을 80% 수준으로 보급하여 선진국 수준을 달성하겠다는 계획이다. 이를 위해 연평균 설치량을 기존 1.7 GW에서 3.7 GW로 확대하고, 민·관이 합심하여 풍력과 태양광을 위한 산업단지(계획입지제도) 지정, 주민 참여 활성화, 지자체 보급계획 수립 의무화 등의 방법으로 보급을 확대하기로 하였다. (2018. 03 한국풍력에너지학회 기술보고서)

한편, 우리나라는 1998년 이래 2018년까지 약 1.3 GW의 풍력발전 설비를 설치하여 운영해 오고 있으며, 그 중 해상풍력발전 설비는 제주도의 탐라해상풍력발전 30 MW를 포함하여 총 38 MW이고 고정식이다. (그림 3)



※ '11년 2,835kW, '13년 1,410kW, '15년 750kW, '16년 4,640kW, '17년 2,760kW, '18년 2,070kW(37기) 출처

그림 3. 연도별 신규/누적 현황.

출처 : 한국풍력산업협회 연차 보고서, 2019. 04

부유식 해상풍력발전 개발 사업으로 '중수심용 부유식 해상풍력발전 파일럿 플랜트 개발' 과제가 2016년 5월 산업통산자원부 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 국내 최초로 수행되고 있으며, 참여 기관은 마스텍중공업, 유니슨, 세호엔지니어링, 울산대학교 등이다. 2019년 10월까지 750 kW급 부유식 풍력발전기를 울산광역시 울주군 신리 앞 2.6 km 내외의 해상에 설치/운영할 계획이다. (그림 4) 또한, 2018년 6월 이래 울산광역시 및 10여개 기관은 '울산 200 MW 부유식 해상풍력 실증단지 설계 및 해상풍력자원 평가기술'과 '5 MW급 부유식 대형 해상풍력 발전시스템 설계기술 개발' 과제를 수행하고 있다.

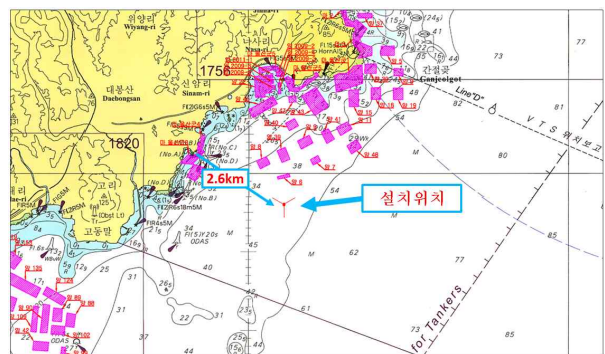


그림 4. 750 kW 부유식 해상풍력발전시스템의 설치 위치 - 울산광역시 울주군 신리.

2.2 국외 현황

전세계의 풍력발전 누적 설비는 2018년 현재 591 GW에 이르며, 그 중 해상풍력발전 설비는 23.1 GW이고 대부분이 고정식 해상풍력발전 설비이다. 2018년 신규 설치는 51.3 GW이고 해상풍력발전 신규 설비는 4.5 GW이다.



그림 5. Market Status 2018.
출처 : GWEC, Global Wind Report 2018, 2019. 04

2018년 신규 풍력발전 설비의 45%가 중국에 의해 설치되었고, 해상풍력발전 신규 설비 또한 중국이 40%, 영국 29%, 독일 22%를 차지하였다. 풍력 에너지 자원은 미국, 러시아, 중국의 순이고, 중국의 풍력 에너지 이론 축적량은 32.26억 kW 규모에 달하며, 2018년 말 풍력발전 누적 규모는 206,804 MW이고 2013년 이후 세계 최대 풍력발전 국가로 등극하였다. (2018년 전 세계 대비 36%) (그림 5~7, 표 1)

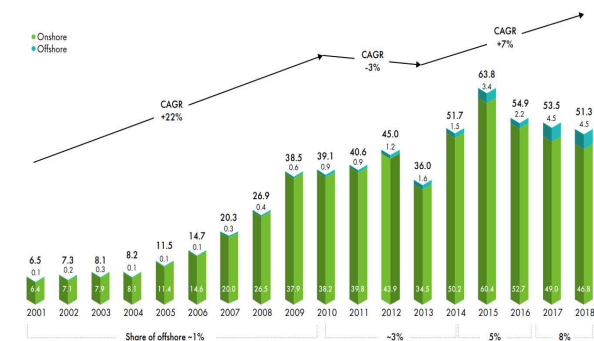


그림 6. Historic Development of New Installations, GW.
출처 : GWEC, Global Wind port 2018, 2019. 04

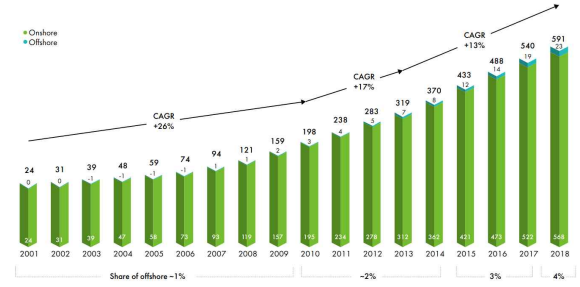


그림 7. Historic Development of Total Installations, GW.
출처 : GWEC, Global Wind port 2018, 2019. 04

표 1. Historic development of total installations, MW.

출처 : GWEC, Global Wind port 2018, 2019. 04

MW offshore	New installations 2017		Total installations 2017		MW offshore	New installations 2018		Total installations 2018	
	Onshore	Offshore	Onshore	Offshore		Onshore	Offshore	Onshore	Offshore
Americas	10,572	123,091	11,940	135,041	Europe	3,176	15,630	2,648	18,278
USA	7,607	89,647	7,348	96,633	United Kingdom	1,715	6,651	1,372	7,963
Canada	241	12,240	566	12,856	Germany	1,253	5,411	949	6,380
Brazil	2,027	12,769	1,939	14,707	Belgium	165	877	309	1,186
Mexico	478	4,058	929	4,555	Denmark	0	1,268	0	1,268
Argentina	24	228	494	722	Netherlands	0	1,118	0	1,118
Chile	269	1,418	204	1,621	Other Europe	63	355	0	302
Other Americas	454	3,383	220	3,405	Asia-Pacific	1,276	2,798	1,835	4,832
Africa, Middle East	432	4,758	962	5,720	China	1,161	2,788	1,800	4,588
Egypt	0	810	380	1,190	South Korea	3	38	35	79
Kenya	0	26	310	336	Other Asia	182	172	0	120
South Africa	618	2,085	0	2,085	Americas	0	30	0	30
Other Africa	14	1,837	272	2,109	USA	0	30	0	30
Asia-Pacific	23,927	231,419	24,902	256,320					
China	18,499	185,054	21,200	206,804					
India	4,148	32,938	3,191	35,129					
Australia	501	4,813	549	5,362					
Pakistan	199	789	400	1,189					
Japan	170	3,399	262	3,661					
South Korea	163	1,162	127	1,229					
Vietnam	38	197	32	208					
Philippines	0	427	0	427					
Thailand	238	648	0	648					
Other Asia	31	1,502	141	1,643					
Europe	13,865	162,506	9,016	171,328					
Germany	5,334	50,779	2,402	53,180					
France	1,692	19,757	1,543	19,307					
Sweden	197	6,499	77	7,216					
United Kingdom	2,641	12,412	589	13,001					
Turkey	756	6,872	487	7,370					
Other Europe	3,235	72,187	3,248	75,435					

2019년 세계 풍력발전 시장은 누적 설비용량 기준 13% 내외의 성장세를 기록하면서, 신규 설비용량 증가분이 약 55 GW (해상풍력발전 증가분 5 GW)를 기록하는 강세를 이어나갈 것으로 예상된다. (그림 6, 그림 7) 블룸버그는 2020년까지 부유식 해상풍력발전 누적 설치용량이 237 MW에 도달할 것으로 전망했다. (그림 8)

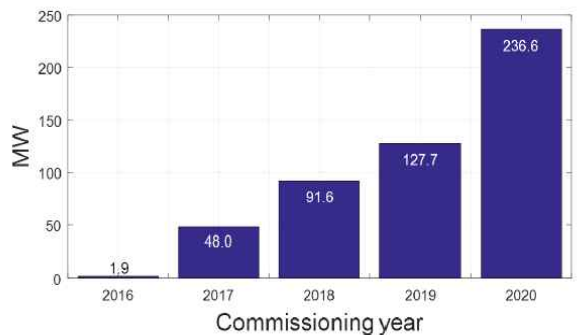


그림 8. 부유식 해상풍력 누적 설치용량 전망.
출처 : Bloomberg, 2017, Race to Build Offshore Wind Farms that Float on Sea Gathers Pace

부유식 해상풍력 발전기 특집

이는 실증 단계인 부유식 해상풍력발전이 상업화에 접어들었다는 신호이다. 2020년 이후 부유식 해상풍력발전의 상업화가 크게 가속화될 것으로 보인다. (표 2)

표 2. 2022년까지 설치 운영 예정인 유럽의 부유식 해상풍력발전 단지.

Wind Farm Name	Country	Capacity (MW)	Commissioning date
Hywind Scotland	United Kingdom	30	2017 (in operation)
Windfloat Atlantic	Portugal	25	2019
Flocan 5 Canary	Spain	25	2020
Nautilus	Spain	5	2020
SeaTwirl S2	Sweden	1	2020
Kincardine	United Kingdom	49	2020
Forthwind Project	United Kingdom	12	2020
EFGL	France	24	2021
Groix-Belle-Ile	France	24	2021
PGL Wind Farm	France	24	2021
EolMed	France	25	2021
Katanes Floating Energy Park -Array	United Kingdom	32	2022
Hywind Tampen	Norway	88	2022

상업화 진행에 따라 투자비용이 높은 부유식 풍력발전시스템의 발전량 대비 설비 설치 단가 또한 감소할 것으로 예상된다.

equinor는 2030년 부유식 해상풍력발전의 전망을 13 GW로 발표하였다. (그림 9)

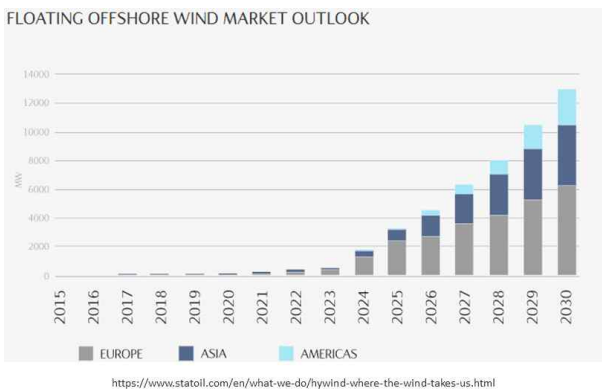


그림 9. equinor의 부유식 해상풍력발전 전망. 출처: <https://www.equinor.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us/the-market-outlook-for-floating-offshore-wind.html>

2017년 9월에 commission된 Hywind Scotland의 2017년 10~12월까지의 이용율은 65.1%에 도달했으며, 특히 11~12월의 이용율은 68%에 해당되었고, 그 기간 중 44.4 m/s의 태풍에도 견디어 내었다.



2017.11~2017.12
68% Average CF, Hywind Scotland

2017
22.5% Average onshore wind CF
41.7% Average offshore wind CF

Source : POWT 2018, Marseille, France, 2018.04.25~27

- The world's first floating wind farm, the 30-MW Hywind Scotland installation off Aberdeenshire, Scotland, achieved an average capacity factor of about 65% during November, December and January.
- Hywind Scotland showed 65.1% during its first three full months in operation in spite of hurricane Ophelia (Max.185km/h) in October and storm Caroline in early December, when wind speeds reached 160 km per hour (44.4m/s) and wave heights 8.2 metres. Wind turbines shut down during the strongest winds, but operation resumed automatically promptly afterwards, the company said.
- StatOil and Masdar aim to reduce the costs of energy from the Hywind floating wind farm to EUR 40-60 (USD 50-75) per MWh by 2030. (EUR 1 = USD 1.251)

<https://www.statoil.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us/https://www.statoil.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us.html>

그림 10. Hywind Scotland, equinor.

해상풍력 시장을 선도하고 있는 유럽의 해상풍력 평균 단지 용량은 379.5 MW에 도달했으며, LCOE 저감을 위해 해상풍력단지 용량은 지속적으로 증가하고 있다. 그림 11에서 나타나듯이 2016년 신규 건설된 해상풍력 단지용량은 379.5 MW이며, 2015년 대비 12% 증가했다. 현재 건설 중이거나, 허가를 받은 단지를 고려하면, 수년 이내 평균 단지용량은 500 MW를 돌파할 것으로 전망된다. 인허가 및 계획 단계에 있는 단지를 고려하면, 규모의 경제 효과 및 설치 능력의 확보로 수년 이내에 평균 단지용량은 1 GW에 도달할 수 있을 것으로 전망된다.

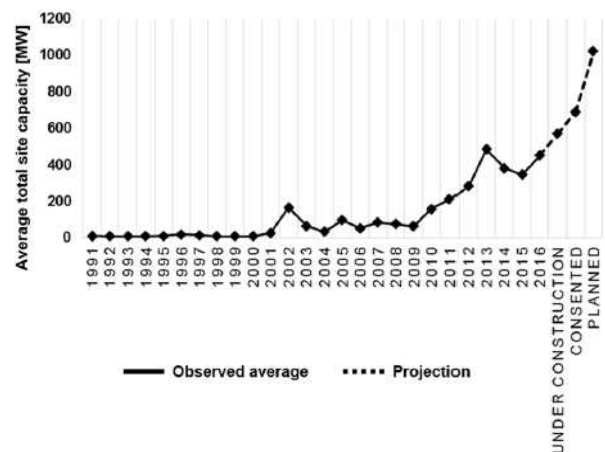


그림 11. 유럽의 연도별 풍력단지 평균 규모. 출처 : Wind Europe, 2016, the European Offshore Wind Industry, Key Trend and Statics

3. 동해 200 MW / 1 GW 부유식 해상풍력발전 실증 단지용 부유체 기본 설계

정부의 재생에너지 3020 이행계획 목표 달성에 기여하기 위하여, '동해 부유식 해상풍력발전단지' 조성을 위한 부유체와 위치제어시스템의 기본 설계를 수행하였다.

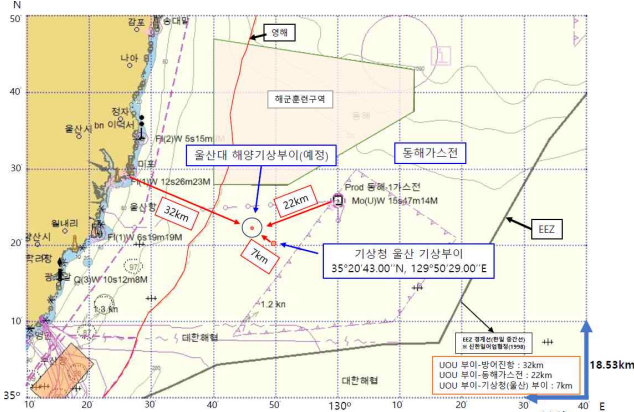


그림 12. 울산대학교 해양기상부이 설치 위치 및 200 MW/1 GW 부유식 해상풍력발전단지 예정지.

3.1 해양환경조건

울산대학교 해양기상부이의 설치 해역은 수심이 약 138 m 이고, 연 평균 풍속이 약 8.0 m/s 되는 지역이므로 부유식 해상풍력발전 단지를 조성하는데 유리한 조건을 가진다. 그림 12는 울산대학교 해양기상부이 설치 위치를 나타내며, 200 MW / 1 GW 부유식 해상풍력발전 실증 단지 예정지와 동일하다. (그림 12)

3.2 부유식 해상풍력발전시스템 기본 설계

200 MW 부유식 해상풍력발전단지 조성을 위한 터빈 1기의 정격 출력은 6 MW로 예상하고 있으며, 이에 필요한 터빈 수는 33개이다. 부유식 해상풍력발전시스템의 터빈 무게는 약 710 톤(로터, 너셀, 타워 각각 127 톤, 200 톤, 383 톤)이며, 터빈 무게를 충분히 지지할 수 있는 네 가지 형상의 부유체와 위치제어시스템을 설계하고 비교 및 분석을 진행하였다.

200 MW/ 1 GW 부유식 해상풍력발전단지 조성을 위한 6 MW급 터빈과 네 가지 형상의 부유체 및 발라스트는 표 3 및 그림 13과 같다.

표 3. 부유체 형상 별 6 MW급 부유식 해상풍력발전시스템의 질량.

단위kg	UOU_Spar	UOU_Semi	UOU_Hybrid	UOU_Advanced Spar
터빈	710,151	710,151	710,151	710,151
부유체	2,600,000	4,393,420	4,600,000	2,428,000
발라스트	10,913,200	8,969,147	10,150,000	3,539,000
합계	14,223,351	14,072,718	15,460,151	6,677,151

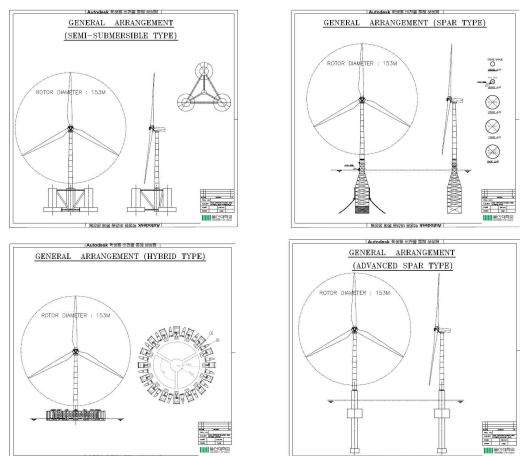


그림 13. 6 MW급 부유식 해상풍력발전시스템의 4 가지 형상.(UOU_Spar, UOU_Semi, UOU_Hybrid, UOU_Advanced Spar)

UOU_Spar는 단순한 원통형 구조이며, 부유체와 발라스트는 각각 2,600 톤과 10,913 톤이다. 위치제어를 위해 3-leg catenary 계류 방식을 채택하며, Yawing운동을 경감하기 위해 Delta connection을 적용한다. UOU_Semi는 세 개의 기둥을 가지는 반잠수식 구조이며, 부유체와 발라스트는 각각 4,393 톤과 8,969 톤이다. 위치제어는 3-leg의 catenary 계류 방식이다. UOU_Hybrid는 풍력발전시스템의 풍력발전과 포일을 이용한 파력발전이 동시에 가능한 친환경적 부유체이며, 부유체와 발라스트는 각각 4,600 톤과 10,150 톤이다. 위치제어는 파랑에너지를 이용하는 플랩 포일(Flapping foils) 배열에 바탕을 둔 자동위치제어시스템과 계류시스템이 같이 설치된다. UOU_Advanced Spar는 단순한 원통형 구조에서 부유체의 운동을 줄이기 위해 부유체

의 중간에 발라스트 탱크를 설치한 구조이며, 부유체와 발라스트는 각각 2,428 톤과 3,539 톤이다. 위치제어를 위해 3-leg catenary 계류 방식을 채택하며 Yawing 운동을 경감하기 위해 Delta connection을 적용한다.

4. 결 언

신정부 2030년의 목표는 신재생풍력설비 16.5 GW이며 그 중 해상풍력발전은 12 GW 가 필요하다. 국내 해상풍력 시장의 발전과 경제성을 고려한 부유식 해상풍력발전 단지 개발을 위해, 대규모 해상풍력단지 선정 및 실증을 통한 Track Record 확보가 필요하다. 정부의 해상풍력발전 보급목표 달성을 위해 상업화 단계 진입을 앞두고 있는 부유식 해상풍력을 도입하여, 먼 바다 에너지원 활용 기술을 확보하고, 세계 최고 조선해양산업의 부유체 제작 기술이 접목되어 새로운 부유식 해상풍력발전 시장의 경쟁력을 높여야 한다.

부유식 해상풍력발전시스템은 해상에 떠있는 거대구조물로서 파도, 바람, 조류, 수심 등의 부환경 조건에 대한 영향에 민감하며, 고정식에 비해 전체적 거동이 크기 때문에 이를 최소화 하기 위한 설계가 관건이다. 고정식 해상풍력발전시스템의 요구 정밀도 수준으로 부유체의 거동을 제어하기 위해서는 부유식 구조물의 계류설비에 대한 매우 엄밀한 설계 기술이 요구 되므로, 부유식 해상풍력발전시스템의 부유체와 계류시스템의 개발을 위한 첨단기술이 확보되어야 한다. 이에, 시장진입 가능성이 높은 부유식 해상풍력발전시스템에 대한 기술연구가 필요하며 CAPEX가 40 억 원/MW 내·외에 수렴하는 목표를 설정할 필요가 있다.

또한, 울산광역시 추진하고 있는 200 MW급 이상 대규모 '동해 부유식 해상풍력발전 실증 단지' 조성 계획은 부유식 해상풍력발전 단지 운영을 위한 고급특화 인력 배출을 가능하게 하며, 부유식 해상풍력발전 사업화로 인해 일자리 창출 (200 MW 설치 시 7,000명, 1 GW 설치 시 35,000명) 및 부유식 해상풍력발전 시장의 확대가 기대된다.

지역과 연계한 사업모델 개발을 통한 지역경제 활성화에 기여하며, 특히 침체된 전국 고용위기 지역의 조선해양 산업체에 활로를 제공하여 재기를 지원하고, 신기후체제(New Climate Regime)에 따른 온실가스 배출 저감이 가능하다.

'동해 200 MW급 해상풍력발전 실증 단지' 계획과 더불어 사업화 및 단지 확대 방안을 수립하여 상업적 가능성을 검증하고, 부유식 해상풍력발전시스템의 보급 확대 기반을 마련할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 한국풍력에너지학회 기술보고서 (2018)
- [2] IEC TS 61400-3-2 (2019)
- [2] 한국풍력산업협회 연차 보고서, (2019)
- [3] GWEC, Global Wind Report 2018, (2019)
- [4] Bloomberg, "Race to Build Offshore Wind Farms that Float on Sea Gathers Pace", (2017)
- [5] equinor, "The market outlook for floating offshore wind", (2019) <https://www.equinor.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us/the-market-outlook-for-floating-offshore-wind.html>
- [6] Wind Europe, "The European Offshore Wind Industry, Key Trend and Statics", (2016)

저자이력



신현경 (申鉉慶)

1973-1979년 서울대학교 조선공학과, 1979-1981년 서울대학교 대학원 조선공학과, 1983-1987년 MIT, Dept. of Ocean Engineering, 1981년-현재 울산대학교 조선해양공학부 교수