

부유식 해상풍력에 대한 소개

An Introduction to Floating Wind Turbines



김 현 조*

* 삼성중공업 대덕산박연구센터 수석연구원

1. 서 론

해상풍력단지는 소음공해 등의 제약조건이 육상풍력단지에 비해서 적고, 건설비용의 증가에도 불구하고 양질의 풍력에너지를 이용한 대형화에 따른 효율의 증가가 가능하여 최근 많은 주목을 받고 있다. 특히 영국은 2020년까지 총 32GW에 달하는 9개의 신규단지를 UK Round 3를 통해서 개발할 예정이며, 이는 5MW 터빈 기준 약 6400여개의 풍력 터빈을 신규로 설치하는 것과 같다.¹⁾ 또한, 유럽연합 국가(EU) 전체로는 54GW의 해상풍력단지가 2020년까지 운용될 것으로 예상되고 있다. 현재 진행 중인 해상풍력단지는 경제성 측면에서 수심 40~50m이내의 얇은 수심이며, 고정식 풍력 터빈을 설치할 예정이다.

이보다 수심이 깊어져서 60~70m 이상이 되면 경제성 측면에서 고정식 풍력 터빈을 투입하기 힘든 것으로 알려져

있다. 이러한 깊은 수심을 위해서는 부유식 풍력터빈의 개발이 반드시 필요하며, 이러한 부유식 풍력터빈의 상용화는 고정식 풍력터빈이 포화되고, 기술의 발달에 따른 투자비용의 감소가 예상되는 2020년 이후에 이루어질 것으로 예측되어 왔다.⁸⁾ 그러나 최근 상대적으로 수심이 깊어서 고정식 풍력터빈을 투입하기가 어려운 미국과 일본 등이 부유식 풍력터빈에 관심을 가지고 프로젝트를 진행 중이다.

미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에 의하면 미국의 50마일 이내의 해안에서 사용가능한 풍력에너지가 4000GW 이상이며, 특히 미국의 Maine주에는 156GW 이상의 에너지가 사용가능하다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 하지만, 대부분의 해저 수심이 60m 이상으로 고정식이 투입되기 힘든 것으로 알려져 있다.¹³⁾ 미 정부에서는 DeepCwind 라는 프로젝트를 통해서 2030년까지 5GW의 부유식 풍력 단지를 개발하는 것을 목표로 부유식 터빈의 개발을 진행하고 있다.³⁾

일본은 2010년에 발생한 원자력발전소의 사고로 신재생 에너지를 이용한 발전에 대해서 관심이 증가하였으며, 특히 사고지역인 후쿠시마 앞바다에 부유식 풍력단지를 개발하기 위한 프로젝트를 진행하고 있다.²⁾

현재 전 세계적으로 상용화를 위해서 플랫폼의 형상과 관련되어 많은 개념들이 개발되고 있으며, 약 25개 이상의

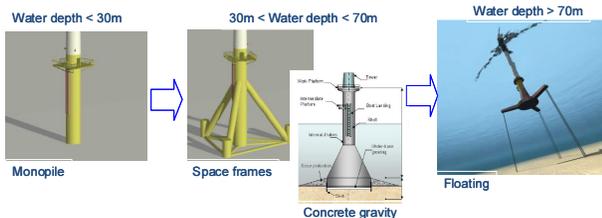


Fig. 1 수심에 따른 플랫폼의 형상 변화

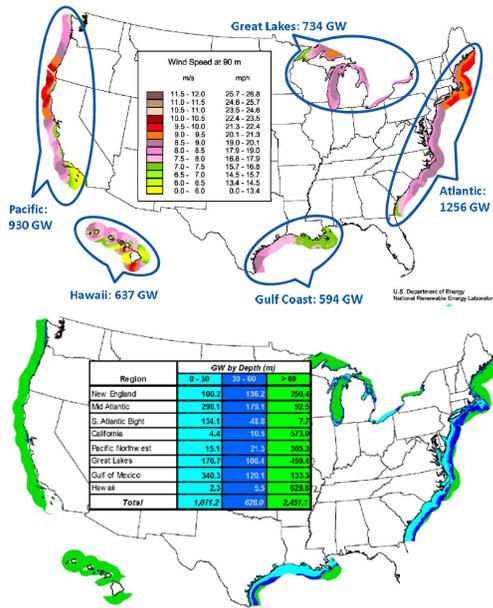


Fig. 2 Offshore wind potential and water depths in USA⁽³⁾

R&D 프로젝트가 진행 중인 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 이 중에서 Statoil Hydro에 의한 SPAR 부이 형태의 Hywind가 노르웨이 근처에서 2.3MW 파일럿 시스템에 대한 실험을 성공적으로 수행한 바 있으며⁵⁾, 2010년 말부터 Principle Power에 의한 Semi-submersible(반잠수식) Windfloat가 실험을 진행 중인 것으로 알려져 있다.⁴⁾

이러한 두 부유식 풍력터빈의 실험과 Vestas, Siemens, Alstom 등 대형 업체의 부유식 풍력터빈 프로젝트의 참여, 일본의 적극적 움직임, 그리고 IEC(International Electrotechnical Commission)의 부유식 풍력터빈 설계 요구 사항에 대한 논의(TC88) 및 ABS, DNV 등 각 선급에서 설계 가이드 작성 등 최근의 움직임을 볼 때 부유식 풍력터빈의 상용화가 예상보다 빨리 진전되는 것이 아닌가 하는 예측도 할 수 있다.

최근 국내에서도 부유식 해상풍력에 대해서 연구가 진행되고 있다. 특히 통합거동 해석프로그램 개발¹⁴⁾ 및 형상에 대한 연구^{15,17,18,19)}가 진행되고 있으나, 아직 R&D 측면이 강하다고 할 수 있다. 국내기업은 고정식 해상풍력 플랫폼과 7MW급의 풍력터빈을 개발 중이며, 정부 주도로 제주 대정해상풍력단지 및 서남해해상풍력단지를 개발하여 기업의 해외 진출에 대한 track record를 확보하기 위한 노력을 하고 있다.

전체적으로 볼 때, 부유식 풍력터빈은 오랜 기간 많은 연구가 이루어졌음에도 아직 부유식 터빈의 안전성에 대해서 의구심이 많은 것이 사실이며, 이를 해소하기 위한 실증시험 단계라고 할 수 있다. 이 글에서는 부유식 해상풍력 플랫폼의

종류 및 선정에 대한 논의와 현재 전 세계적으로 진행 중인 부유식 풍력 프로젝트에 대해서 간략히 소개하고자 한다.

2. 부유식 해상풍력 플랫폼

부유식 해상풍력 터빈과 고정식 터빈과의 가장 큰 차이는 터빈을 지지하는 플랫폼이 해저면에 고정되지 않고 물 위에 떠 있다는 것이고, 이에 의해서 1) 나셀의 큰 무게가 80m이상의 높이에 집중되면서 반드시 정적안전성(stability)을 확보하여야 하고, 또한 바람 하중에 의한 정적 기울어짐이 발생하여 발전 효율의 저하 가능성이 있다. 또한, 2) 파도, 조류, 바람 등의 환경에 의하여 6자유도 운동을 하게 된다는 점이다. 터빈의 경우 나셀이 수선면에서 80m이상의 높은 위치에 놓이게 되므로, 특히 파도 주기의 운동에 의한 큰 가속도에 노출될 수 밖에 없다. 이로 인해서, 부유식 해상풍력의 플랫폼의 설계는 높은 정적안전성을 유지하면서, 파도에 의한 운동을 최소화하여야 한다.

일반적인 부유체에서 높은 정적안전성을 얻기 위해서는 이차 수선면적 모멘트를 크게 하여야 한다. 반면에 파도 중 운동을 작게 하기 위해서는 수선면적을 작게 설계를 하여야 하며, 이는 정적안전성의 확보와는 상충된다. 이와 같이 높은 정적안전성과 운동성능을 둘 다 동시에 만족시키기는 힘들다고 할 수 있다. 특히, 일반 구조물보다 무게중심이 높을 수 밖에 없는 풍력터빈은 정적안전성을 높이기 위해서는 수선면적이 커지면서 파도 중 운동이 커질 수 밖에 없다.

따라서, 수선면적을 최소화하고 플랫폼의 무게중심을 아주 낮추거나(SPAR), mooring line을 이용하여 정적안전성 및 운동성능을 높이는 TLP(Tension Leg Platform) 등이 초기부터 많이 검토되어 왔다. 노르웨이에서 개발되고 있는 Hywind⁵⁾가 대표적인 SPAR 형태의 부유식 풍력터빈이며, 네덜란드에서 개발 중인 Blue H⁶⁾ 등의 TLP 형태의 플랫폼이다. 하지만, SPAR는 흘수가 100m가 넘는 등 150m 이상의

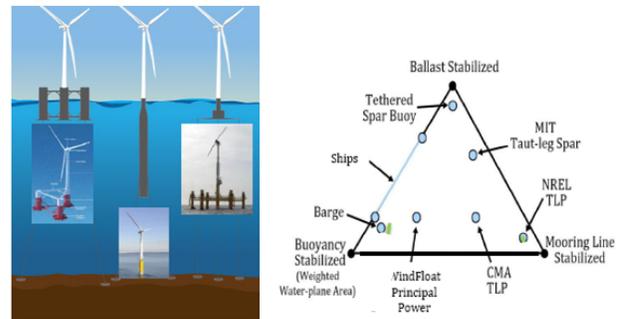


Fig. 3 Types of floating wind turbine categorized by the method of stabilization⁽³⁾

Table 1 Comparison of floating wind turbines

Type	Semi-submersible	SPAR	TLP
Name	Windfloat[4]	Hywind[5]	Blue H[17]
Developer	Principle Power (US)	Statoil Hydro (NO)	Blue H (NL)
Stability	Hydrostatic	Ballast	Mooring
Water depths	> 40m	> 150m	> 40m
Turbine Installation	Onshore	Offshore	Onshore
Installation	Wet-towing	Tow-out and upending	Tow-out on buoyancy module until connection
Mooring	Spread (catenary)	Spread (catenary)	TLP
Motions in Waves	Good	Very Good	Very Good
Strengths	Low cost on installation	Motion in waves	Motion in waves
Challenges	High cost on construction	Deep water depths High cost on installation	High cost on mooring and installation

수심에서만 적용 가능하고, TLP는 계류삭으로 사용되는 tendon의 고비용 및 파손시의 위험성 등의 문제가 있다.

다른 적용가능한 형태의 부유체로는 단일 부체의 바아지 형태 혹은 다수의 부유체를 연결한 Semi-submersible이 있다. 바아지는 넓은 수선 면적으로 손쉽게 정적안정성을 확보할 수 있지만, 파도 중 운동성능이 나빠서 부유식 터어빈에는 적용하기가 힘들다. Semi-submersible의 경우 수선면적을 멀리 배치함으로써 정적안정성을 높일 수 있지만, 파도중 운동성능은 SPAR 혹은 TLP보다 좋지 않다고 알려져 있다. 그러나 최근에는 미국에서 개발되고 있는 Windfloat⁴⁾에서 볼 수 있듯이 운동저감장치를 붙여서 운동성능을 개선하는 방안을 마련하고 있다. Semi-submersible은 높은 정적안정성이 보장되고, 70~100m의 낮은 수심에서도 적용가능한 장점이 있어서, 파도 중 운동성능을 개선한다면 상업화에 유리한 플랫폼이라고 할 수 있다.

Fig. 3에서는 앞서 말한 SPAR, TLP, Semi-submersible의 형상과 안정화 방법에 따라서 분류된 플랫폼의 종류를 보여주고 있다.

부유식 풍력 플랫폼의 성능은 앞서 논의한 정적안정성/파도중 운동성능 이외에 환경외력에 대하여 위치를 유지하기 위한 계류시스템, 이송 및 설치방법, 그리고 인증 등을 고려하여 평가되어야 한다. 그리고, 가장 중요한 것은 풍력 단지에 수십 또는 수백개의 풍력터어빈이 설치되어야 하므로 제작비용을 최소화할 필요가 있다. 사실 이러한 모든 설

계 요구 조건은 새로운 것이 아니라 수십년간 개발되어온 심해유전 개발을 위한 플랫폼 설계의 연장선에 있으며, 지금까지 연구되어온 플랫폼의 형상 중에서 부유식 풍력에 적합한 플랫폼을 적용하고 있다고 할 수 있다.

Table 1에 앞서 소개한 가장 대표적인 부유식 해상풍력 플랫폼, SPAR, TLP, Semi-submersible에 대해서 장단점을 비교하였다. 표에서 보면 알 수 있듯이 각 플랫폼이 장단점을 가지고 있기 때문에 플랫폼의 형상을 결정하기가 쉽지 않다고 할 수 있다.

3. 부유식 풍력터어빈 개발 동향

Table 2에 현재 전 세계적으로 개발되고 있는 주요 부유식 풍력 플랫폼과 프로젝트들을 나타내었다. 전 세계적으로

Table 2 List of currently active projects¹²⁾

Project Name	Country	Type of Platform	Minimum water depth [m]
Hywind ¹⁾	Norway	Spar	> 150
Windfloat ¹⁾	USA	Semi-sub ⁴⁾	50
DeepCwind ⁵⁾	USA	Semi-sub	-
GICON TLP ³⁾	Germany	TLP	18
HiPR Wind	EU	Semi-sub	-
Vertiwind Floater ²⁾	France	Semi-sub	-
WinFlo Floater	France	Semi-sub	50
Blue H TLP ³⁾	Netherlands	TLP	-
Poseidon Floating Power	Denmark	Semi-sub	40
Pelagic Power	Norway	Semi-sub	-
Nautica AFT	USA	Spar	-
IDEOL Floater	Netherlands	Semi-sub	35
Pelastar TLP ³⁾	USA	TLP	65
Sway Floating Tower ³⁾	Norway	Spar	55~400
Windsea Floater ³⁾	Denmark	Semi-sub	25~30
TriFloater ³⁾	Netherlands	Semi-sub	50
DIWET	France	Semi-sub	-
Hexicon Floater	Sweden	Semi-sub	26
Sea Twirl	Sweden	Spar	-
Sea Breeze	UK	TLP	-
Kabashima Hybrid Spar ²⁾	Japan	Spar	100
Mitsui Semisub	Japan	Semi-sub	-
Hitachi Semisub	Japan	Semi-sub	-
IHI Advanced Spar ³⁾	Japan	Spar	-
Mitsubishi Floater	Japan	Semi-sub	-
Wind Lens Floater ²⁾	Japan	Semi-sub	-
Shimizu Semisub	Japan	Semi-sub	25
Mitsui TLP	Japan	TLP	60

1. Full scale test, 2. Scaled pilot test, 3. Model test, 4. SPAR와 TLP를 제외한 다수의 부체로 이루어진 플랫폼 형상인 Semi-sub로 분류함. 5. 80kW scaled pilot test 진행중.

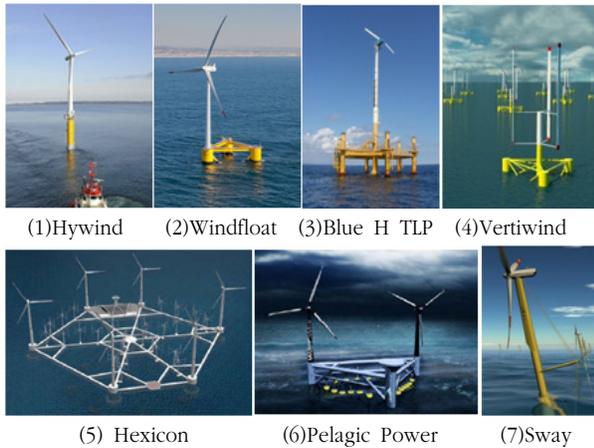


Fig. 4 Developing floating wind turbines



Fig. 5 VoltturnUS: Scaled pilot floating wind turbine of DeepCwind project (20kW)

약 25개 이상의 개발 과제들이 진행되고 있으며, 이 중 2MW의 full scale 시험을 수행 중인 것은 Hywind, Windfloat의 두 개이며, 축소 모델의 검증시험을 진행 중인 과제들이 약 4개 정도 된다고 할 수 있다. SPAR, TLP와 Semi-submersible 형태를 중심으로 하나의 풍력터어빈이 설치되는 플랫폼이 주로 개발이 되고 있으며, 다수의 터어빈을 설치하거나 (Poseidon, Hexicon, WindSea, Pelgaic Power, Wind Lens), 풍력과 파력의 복합발전 (Pelgaic Power, Poseidon), 또는 풍력과 태양광의 복합발전 (Wind Lens)의 형태도 제안되고 있다. Fig. 4에 주요 풍력터어빈의 형상이 나타나 있다.

여기서 주목할만한 두 개의 프로젝트로 1) 미국 동부 해안의 DeepCwind 프로젝트, 2) 일본의 후쿠시마 앞 바다에 건설이 추진중인 풍력발전 단지를 들 수 있다.

미국 정부에서는 DeepCwind³⁾ 프로젝트를 통해서 2030년까지 5GW의 부유식 풍력단지를 개발하는 것을 목표로 부유식 터어빈의 개발을 진행하고 있다. 이 일환으로 2011년 SPAR, TLP, Semi-submersible 세 개의 대상선에 대하여 모형시험을 MARIN(네덜란드)의 해양수조에서 수행하였고, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 2013년 5월에 1/8 사이즈인 20kW

Table 3 Fukushima floating pilot wind farm

Facility Name	Scale	Wind Turbine Form	Floating Form	Project Term
Floating Substation	25MVA 66kV	Substation	Advanced Spar	First
Wind Turbine	2MW	Downwind Type	4 Column Semi-Sub	First
Large Wind Turbine	7MW	Oil Pressure Drive Type	3 Column Semi-Sub	Second
Large Wind Turbine	7MW	Oil Pressure Drive Type Or Downwind Type	Advanced Spar	Second

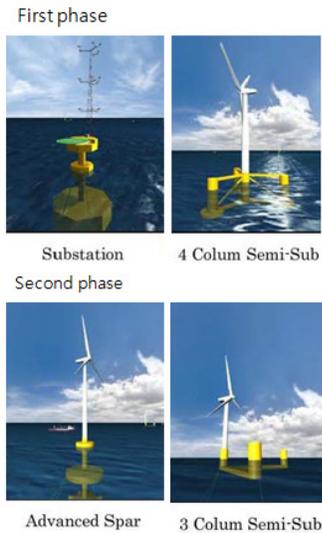


Fig. 6 Platforms for Fukushima floating wind farm

용량의 파일럿시험을 시작하였다. 계획상으로는 2015년까지 3~5MW급의 실선 시험을 수행할 예정이다.

일본은 대부분의 해상풍력 에너지가 수심이 깊은 영역에 있기 때문에 오랫동안 부유식 해상풍력에 대한 연구를 하였다. 하지만, 상용화에 대한 움직임은 일본 정부에 의하여 후쿠시마 앞바다에 실증용 풍력발전단지를 건설하는 계획이 발표되면서 본격화되었다고 볼 수 있다.²⁾

Table 3에 나타나 있듯이 이 프로젝트에서는 2013년에 2MW의 풍력터어빈과 66kV의 power sub-station과 전력선의 설치를 계획하고 있으며, 2015년까지 두 종류의 두 7MW 풍력터어빈을 설치할 계획이다. 이를 위해서 Marubeni를 책임기업으로 하여 동경대, Mitsubishi, Mitsubishi 중공업, IHI Marine United, Mitsui Engineering & Shipbuilding, Nippon Steel, Hitachi, Furukawa Electric, Shimizu and Mizuho Information and Research가 콘소시엄을 구성하여 프로젝트를 진행하고 있다.

4. 부유식 풍력터어빈의 성능 해석 기술

부유식 풍력터어빈은 수면에 떠 있는 플랫폼, 회전하는 블레이드를 가진 풍력터어빈, 플랫폼과 풍력터어빈을 연결

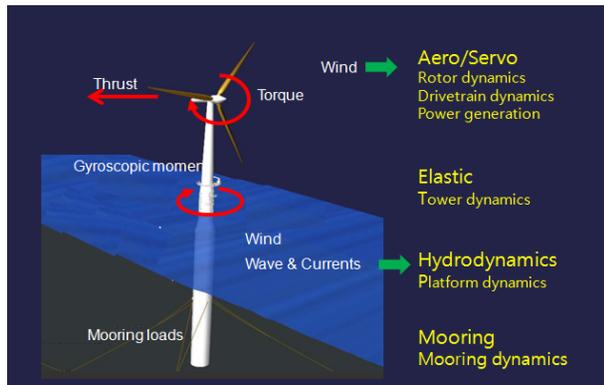


Fig. 7 Definition of problem to analyze the performance of wind turbines

하는 긴 타워로 이루어져 있다. 플랫폼의 하단에는 위치를 고정하기 위한 계류시스템이 설치되어 있고, 풍력터어빈에는 전기 생산 효율을 높이기 위해서 블레이드의 pitch 및 yawing 각도 제어기가 설치된다.

부유식 풍력터어빈은 해상에 설치되기 때문에 조류, 바람, 파도의 환경외력을 받게 된다.

Fig. 7에서 보여 주듯이, 부유식 풍력터어빈은 바람에 의한 풍력터어빈의 aerodynamics and controller(servo), 바람/조류/파도에 의한 플랫폼의 hydrodynamics와 mooring dynamics, 그리고 타워의 dynamics이 연성된 aero-hydro-servo-elastic의 문제로 표현할 수 있고, 이런 모든 연성효과를 고려하여 풍력터어빈의 성능을 해석하기 위한 연구가 진행중이다.

이런 연성효과를 모두 포함하여 문제를 풀 수 있는 해석 모델들이 개발되고 있으며, 이중에서 FAST (NREL), SIMO/RIFLEX+HAWC2 (MARINTEK), GH-bladed (Garrad Hassan) 등이 대표적이라고 할 수 있다. 하지만, 이러한 연성거동해석 모델은 모형시험이나 실선 계측 데이터로 검증되지 못한 문제가 있으며, 그 주요 원인은 아직 충분한 모형시험의 데이터가 축적되지 못한다에 기인한다고 할 수 있다.

현재 기 개발된 해석 모델들에 대한 검증은 해석모델들의 결과에 대한 상호 비교를 통해서 이루어지고 있는데, IEA (International Energy Agency) Wind가 주도하고 있다. “Task 30: Comparison of Dynamic Computer Codes for Offshore Wind Energy” 중에서 Offshore Code Comparison Collaboration (OC3 and OC4) 프로그램을 통해서 전 세계적으로 연구소, 학계, 기업들의 참여하에 동일한 대상선 즉, OC3 에서는 SPAR, OC4에서는 semi-submersible, 에 대한 계산 결과를 비교함으로써 개발된 해석 모델들의 차이를 줄이려는 노력을 하고 있다.⁷⁾

모형시험은 성능 검증을 위한 또 하나의 주요한 방법이며, 전통적으로 심해유전 개발 및 생산 플랫폼의 설계를 위



Fig. 8 Snapshot of model test of floating wind turbine²⁰⁾

하여 사용되어 왔다. 하지만, 터어빈의 연성효과를 고려한 부유식 풍력 플랫폼에 대한 모형시험은 아직 시도 자체가 도전적으로 여겨질 만큼 시도가 많지 않았고, 모형 시험에 대한 적절한 기법자체의 논의도 시작 단계라 할 수 있다.²¹⁾

2012년에 DeepCwind consortium에서 주관한 MARIN (네덜란드)에서 체계적이고 광범위한 시험이 이루어졌지만,¹¹⁾ 그 이외의 시험의 결과는 거의 발표되지 않고 있다. 최근 국내에서도 다양한 형상에 대한 모형시험이 수행되고 있으며^{10,19)}, 블레이드를 회전시키면서 연성효과를 보기위한 모형시험을 수행한 바 있다(Fig. 8).²⁰⁾ 이 실험에서는 실선과 모형선의 Reynolds 수의 차이에 의한 공력특성의 차이를 줄이기 위하여 모형 블레이드를 새로 설계하여 실제에 근접한 thrust를 얻었으며, 카본 섬유로 가벼운 모델 블레이드를 제작하여 모형시험을 수행하였다.

앞으로 많은 모형시험이 수행되어 충분한 데이터를 확보하여야 해석모델의 검증과 추후 인증에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

부유식 풍력터어빈은 아직 상업화 이전 단계이므로, 인증 및 설계 가이드에 대한 기술개발을 각 선급에서 진행중에 있다. ABS²¹⁾, DNV, 한국선급 등은 각각 설계 가이드를 준비하고 있으며, 세계적으로 한국선급의 주도하에 IEC (International Electrotechnical Commission) TC88에서 부유식 해상풍력 설계 표준화 작업을 진행 중에 있다.¹⁶⁾ 이 회의에 국내에서는 한국선급 외에 울산대학교, 포항대학교, 한국해양과학기술원, 한국기계연구원, 삼성중공업 등이 참여하고 있다.

5. 결론

앞에서 부유식 해상풍력에 대해서 개략적으로 살펴보았다. 전 세계적으로 많은 프로젝트가 진행 중이며, 몇 개의

프로젝트는 실증 단계를 거쳐서 상용화의 전단계에 있다고 할 수 있다. 아직 국내에서는 기업은 고정식 해상풍력의 중심으로 개발 중에 있으며, 연구소와 학교를 중심으로 해석 프로그램 개발, 모형시험 등이 진행되고 있으며, 적합한 형상개발을 시도하고 있다. 미국과 일본을 중심으로 예상보다 빠르게 상업화가 진척될 수도 있을 것으로 보이며, 상대적으로 고비용을 해결할 수 있는 방법과 부유식에 적합한 터어빈의 기술개발에 많은 연구자들의 관심이 필요한 시점이라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. UK Offshore wind report,
<http://www.thecrownstate.co.uk/energy/offshore-wind-energy/>
2. <http://www.marubeni.com/news/2012/120306e.htm>
3. <http://deepcwind.org/>
4. <http://www.principlepowerinc.com/>
5. <http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/RenewablePowerProduction/Offshore/Hywind/Pages/HywindPuttingWindPowerToTheTest.aspx>
6. <http://www.bluehgroup.com/>
7. http://www.ieawind.org/task_30/task30_Public.html
8. B. Valpy, "Offshore wind market requirement: Demand-side review and technology trends relating to installation", SHI-LR 공동포럼, 2010
9. Energy Information Association (EIA), "State energy profiles: Maine", US Energy Information Association, 2011
10. H. K. Shin, "Model test of the OC3-Hywind floating offshore wind turbine", Proc. of 21st ISOPE, Maui, Hawaii, Vol.1, pp.361~366, 2010
11. Koo, B., Goupee A., Lambrakos, K. Kimbal, R.. (2012). "Model Tests for a Floating Wind Turbine on Three Different Floaters", Proc. of the 31st OMAE, OMAE2012-83642, Rio de Janeiro, Brazil.
12. Main(e) International Consulting LLC, Floating Offshore Wind Foundations: Industry Consortia and Projects in the United States, Europe and Japan, 2012
13. W. Musial, S. Butterfield, B. Ram, "Energy from offshore wind", NREL, 2006
14. 고진용, 이성균, 이기표, 임채환, 송진섭, 조희제, "형상과 계류삭 연결위치 변화에 따른 Spar형 부유식 해양구조물의 시간영역 운동응답 해석", 한국풍력에너지학회 추계학술대회, pp.175~181, 2011
15. 고혁준, 조일형, "계류된 부유식 풍력발전시스템의 운동성능 해석", 한국풍력에너지학회 추계학술대회, pp. 201~206, 2011
16. 김만응, "해상풍력 관련 국제 표준화 동향과 전망", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2013
17. 김진하, 홍사영, 김현조, 김세은, "부유식 해상풍력 플랫폼의 형상설계 연구", 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2012
18. 김진하, 홍사영, 김현조, "부유식 해상풍력플랫폼의 형상설계에 대한 운동 및 가속도 응답의 비교 연구", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2013
19. 김현조, 김세은, 서종수, 김진하, 홍사영, "SPAR와 반잠수식 형태의 부유식 해상풍력플랫폼의 형상설계에 대한 파도 중 운동성능", 한국풍력에너지학회 추계학술대회, 2012
20. 김현조, 정재호, 김기현, 홍사영, 김진하, "블레이드 연성을 고려한 부유식 풍력 터어빈 모형시험에 대한 연구", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2013
21. Floating Wind Turbines prepared by ABS in May 2012 

[담당 : 장범선 편집위원]