



부유식 해상풍력발전의 현황과 전망*

배운혁**, 최항순***

The state of art and prospect of floating offshore wind turbine*

Yoon Hyeok Bae** and Hang Sun Choi***

ABSTRACT

Recently extreme weathers occur often every corner on the globe and the aftermath reaches beyond the resilience capacity of our planet. A sharp reduction in CO₂ emission is required to slow global warming and avoid severe impacts on human health and ecosystem. The 2016 Paris agreement set a target of limiting warming to 1.5°C till the end of this century by means of Net Zero Emissions by 2050. Following this scenario, the global energy mix undergoes a profound transformation to low-emission sources like wind power. Over the past decade, there have been rapid increase in offshore wind turbine installations, particularly of floating type in deeper water. In this study, the floating wind turbines (FOWTs) already deployed or under construction are surveyed and classified by floater type. It is found that most FOWTs are equipped with horizontal-axis turbines and set on spar or semi-submersible platforms. Theoretical, numerical and experimental

* 본 논문은 2023년도 대한민국학술원 전문학술활동 연구비 지원으로 이루어짐

** 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 교수

*** 대한민국학술원 자연과학부 제3분과 회원

methods are discussed for estimating the structural response under the action of environmental loads. A particular attention is paid on the unstable response caused by the Mathieu-type instability and the improper frequency of the blade pitch controller for spar platforms. In order to get more clear insights and accurate predictions for FOWTs, further research is necessary and it seems to be done in the area of computational fluid dynamics (CFD) and real time hybrid simulations (RTHS).

Key words : computational fluid dynamics (CFD), environmental loads, floating offshore wind turbine, platform type, real time hybrid simulation (RTHS), structural response

초 록

본 연구에서는 지금까지 설치된 부유식 해상 풍력 발전기와 발전단지의 현황을 살펴 보면서 이들을 터빈의 회전축과 부유체의 종류에 따라 분류하며 그 특성을 분석하였다. 그 다음에는 해상풍력발전의 구성요소인 부유체, 계류계, 터빈과 로터-발전장치 그리고 이에 대한 제어시스템을 고찰하였다. 해상 풍력에 작용하는 환경하중은 유체 역학적 방법과 공기역학적 방법으로 나누어 접근하였다. 이러한 하중을 받는 해상 풍력 발전기의 응답을 비연성해석, 수치해석 그리고 실시간 하이브리드 시뮬레이션으로 해석하는 방법을 소개하며, 각 방법의 장단점을 짚어 보았다. 이어서 특이현상으로 스파 플랫폼에서 수직운동과 종동요의 고유주파수가 배수관계가 되면 나타나는 Mathieu형의 불안정 운동을 예시하였다. 또한 날개의 피치를 제어하는 주파수가 타워의 고유진동수보다 높을 때 나타나는 스파플랫폼의 불안정 응답을 논하였다.

해상 풍력은 효율성이 높은 수평축 터빈이 대부분이며, 부유체는 운동성능이 좋고 갑판면적이 넓은 반잠수식 플랫폼이 선호되고 있다. 해상 풍력에 대한 환경하중과 동적 거동을 규명하는 여러 가지 이론적 및 실험적 방법들이 있으나 완벽하지 못하다. 앞으로는 수치유체역학방법(CFD)과 실시간 하이브리드 시뮬레이션(RTHS)이 더욱 발전하여 널리 사용될 것으로 보인다. 탄소중립을 위하여 해상풍력은 지속적으로 성장할 것이며, 특히 여러 개의 터빈을 수용하는 풍력단지로 발전하여 생산된 전력으로 그린 수소를 생산하는 대체에너지시스템이 각광받을 것으로 전망된다.

주제어 : 계산유체역학, 환경하중, 부유식 해상풍력, 플랫폼의 종류, 실시간 하이브리드 시뮬레이션, 구조물의 동적응답

목 차

I. 서론	V. 전망
II. 해상풍력의 구성요소	VI. 결론
III. 하중계산법	참고문헌
IV. 해상풍력의 응답해석	

I. 서론

금세기 인류가 당면한 중대한 현안 중 하나인 기후변화로 인하여 지구촌 곳곳에서 이상기후가 빈번하게 발생하고, 이로 인한 재해가 이제 감당할 수 없는 수준에 이르렀다. 이러한 기후변화의 가장 큰 원인은 온실가스 배출에 있음을 유엔의 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 여러 차례 발행한 보고서에서 그 인과관계를 과학적으로 입증하였다.

온실가스 배출은 현대사회를 지탱시켜주는 전력생산, 산업활동, 수송수단 등에 효과적으로 사용되는 에너지원에, 특히 화석연료에 기인하는 것으로 알려져 있다. 이 문제는 사실 오래전부터 인식되어 화석연료의 사용을 억제하자는 운동이 전 세계적으로 펼쳐졌지만, IEA(International Energy Agency)에 따르면 화석연료는 여전히 세계 총에너지의 거의 80%를 차지하고 있다.

이제 더 늦기 전에 화석연료의 사용을 대폭 감축하고, 대신 신재생에너지의 사용을 확대하며, 동시에 기존 시스템의 에너지 효율을 높여 에너지 소비를 줄이고, 한 걸음 더 나아가 탄소를 포집하고 이용하는 등 에너지 믹스를 실행하여야 한다 [최 2023].

이를 위하여 IEA는 2021년에 개최되었던 제26차 유엔기후변화협약국(UNFCCC) 총회에서 특별보고서 “Net Zero by 2050(NZE)”를 발표하면서 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위한 로드맵을 제시하였다. 즉, 2050년에는 순 탄소배출을 0으로 만들어야 하며, 이를 위하여 화석연료의 사용을 전체 에너지의 20% 수준으로 감축하고, 대신 풍력, 태양광, 수력에너지 등 대체에너지가 전체의 2/3 이상이 되어야 한다는 것이다(그림 1참조). 이에 따르면 풍력은 지금보다 11배 이상 증

가하여야 한다[유 2023].

풍력발전에 대하여 자세히 살펴보면 2021년에 전 세계 풍력발전용량은 당해연도에 설치된 용량 93.6GW를 포함하여 모두 약 837GW에 이르렀다. 상기한 신규 설치 용량 93.6GW중 72.5GW는 육상 풍력이며, 나머지 21.1GW는 해상 풍력이다. 이는 2020년의 해상 풍력 발전량 6.9GW의 세 배에 해당한다[Lee & Zhao 2022]. 해상 풍력은 육상 풍력에 비하여 풍속이 높고, 풍향의 변화가 적으며, 소음에 대한 주민의 민원을 피할 수 있어 유리하다. 이러한 장점과 함께 해상 풍력은 대체에너지원 중에서 발전 용량이 매우 높아 탄소중립 사회로 향하는 대안으로 인정되어 그림 2에 보인 바와 같이 지난 20년간 꾸준히 증가하였는데, 특히 지난 5년 동안 괄목할 만한 성장을 보였다.

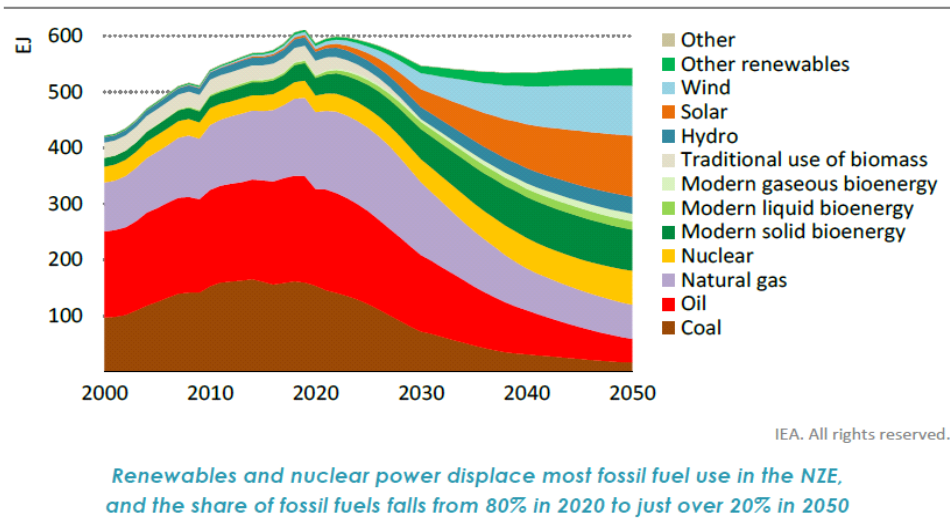


그림 1. NZE를 위한 총에너지 공급 전망

우리나라도 2023년 3월 21일 “제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 (2023-2042)”을 발표하였다. 이 기본계획은 우리나라가 국제사회에 약속한 2030년까지 국가 온실가스를 2018년 대비 40% 감축하겠다는 목표를 달성하기 위해, 경제·사회 여건과 실행 가능성 등을 종합적으로 고려하여 부문별·연도별 감축목표와 수단 등 이행 방안을 밝힌 것이다. 이 계획에는 2030년까지 풍력 발전을 14.3GW로 대폭 확대하겠다는 내용을 포함하고 있다.

한편 해상 풍력 터빈은 고정식 혹은 부유식 하부구조물 위에 설치된다. 얕은 수심에서는 구조물을 안정적으로 지지하며 경제적인 모노파일(Monopile), 트리팟(Tripod), 자켓(Jacket) 또는 중력 기반(Gravity-based) 구조와 같은 고정식 구조물에 해상 풍력 터빈이 설치된다[Oh et al. 2018]. 그러나 60m이상의 수심에서는 고정식 구조물이 비경제적이므로 부유식 하부구조물이 대안으로 제시되었다.

부유식 해상 풍력 터빈(Floating Offshore Wind Turbine, FOWT)은 그림 3에 도시되어 있는 바와 같이 스파형(Spar), 반잠수식(Semi-submersible), 바지형(barge) 그리고 인장각식 플랫폼(Tension leg platform)등과 같은 구조물이 사용된다.

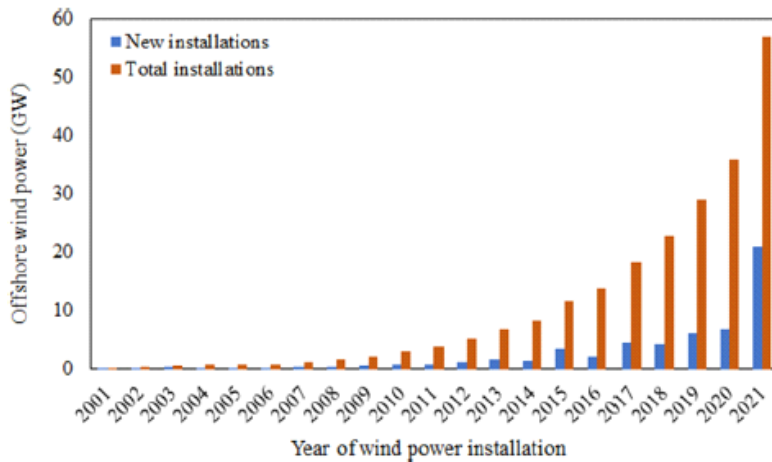


그림 2. 2001-2021년간 전세계 해상풍력발전의 신규 및 총 설비 추이 (Lee et al. 2022)

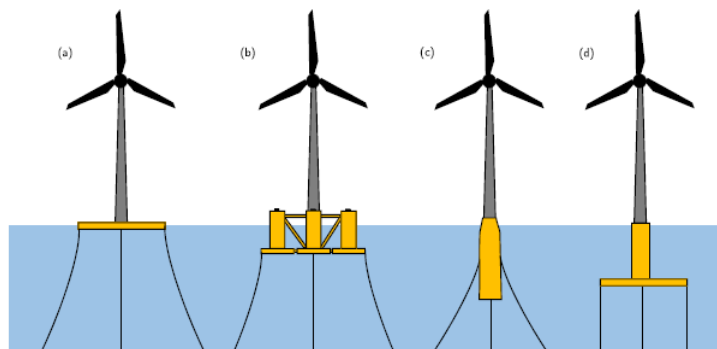


그림 3. 해상 풍력 터빈을 지지하는 부유식 하부구조 (a) Barge (b) Semi-submersible (c) Spar (d) Tension leg platform

부유식 해상 풍력 터빈은 수평축 풍력 터빈(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) 또는 수직축 풍력 터빈(Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)과 같이 회전축에 따라 분류할 수 있다. HAWT는 무거운 중량의 발전기가 타워의 꼭대기에 위치하지만, VAWT의 경우에는 타워의 바닥에 위치하여 상대적으로 안정적이며 유지와 보수에 유리하다. 또한 HAWT는 풍향에 로터(Rotor)의 방향을 맞추기 위하여 요(Yaw) 제어 메커니즘이 필요하나 VAWT는 바람의 방향에 영향을 받지 않는 장점이 있다. 그러나 VAWT의 결정적 단점은 HAWT에 비해 발전 효율이 낮다는 점이다. 이러한 이유로 전 세계 대부분의 부유식 해상풍력설비는 높은 효율성 때문에 HAWT를 채택하고 있다. 이런 점을 감안하여 본 연구에서는 HAWT를 대상으로 택하였다.

현재 부유식 풍력발전의 점유율은 전체 풍력발전의 약 0.1%에 불과하지만, 앞으로 급격히 증가하여 부유식 풍력발전은 2020년 이후 2030년까지 신규 풍력발전 설비의 약 6.1%에 도달할 것으로 예상된다. 최근에 발간된 전문지에 따르면 현재 세계적으로 285개의 해상풍력발전 계획이 추진되고 있는데, 그 중에서 160GW는 유럽의 해역에서 나머지는 미국과 오스트렐리아의 해역에서 이루어지고 있다고 한다. 현 시점에서 실제로 7개국의 14개의 프로젝트에서 227MW가 생산되고 있는데, 노르웨이가 주관하는 3개의 프로젝트에서 생산하는 94MW가 가장 크며, 영국, 포르투갈 그리고 중국이 그 뒤를 따르고 있다고 한다[Offshore Oct. 2023].

전 세계에서 운용중인 부유식 수평축 풍력발전소의 현황은 표 1과 표 2에 정리하였다[Subbulakshmi et al. 2022]. 첫 부유식 해상풍력은 노르웨이가 실험적으로 실시한 “Hywind”로 명명된 2.3MW급 스파형 구조물로 수심 220미터에 설치되었다[Hywind Homepage]. 그 뒤를 이어 포르투갈이 2MW급 반잠수식 “WindFloat”을 건조하였다[Windfloat Homepage]. 참고로 본 보고서에서는 이들 표에 표시된 참고문헌의 번호는 무시하고 별도의 번호를 기재하였다. 이 분야에서 선도적으로 수행한 실증 연구이며 관련 자료가 널리 공개되어 있기 때문에 그 후 이어지는 부유식 해상풍력에 대한 연구의 대상 구조물이 되어 여러 연구자들이 다양한 관점에서 분석하였다.

한편 스코트란드와 포르투갈은 대서양 해역에 여러 개의 해상풍력을 또는 하나의 대형 플랫폼에 다수의 풍력 터빈을 수용하는 해상 풍력 단지를 건설하였다[Kincardine Homepage]. 이에 따라 해상 풍력에 대한 연구도 단일 해상 풍력

부유식 해상풍력발전의 현황과 전망

에 머물지 않고 복수의 해상 풍력으로 확대되었다[Bae & Kim 2014a, b]. 이들 해상 풍력을 살펴보면 설치 해역의 수심은 33미터에서 220미터까지 다양하며, 로터의 직경은 80미터 이상으로 발전용량은 각기별 2~7MW에 이른다. 한편 풍력단지 경우에는 수심이 보통 100미터, 로터의 직경이 150미터 그리고 발전용량이 25~50MW에 이른다.

현재 건설중인 해상풍력단지로는 노르웨이가 수심 300미터의 해역에 8MW급 발전기 11개를 수용하는 “Hywind Tangen” 프로젝트를 진행시키고 있는데, 로터의 직경이 167미터에 이르며 콩크리트로 건조한 스파형 플랫폼을 채용하고 있다. 한편 프랑스는 수심 55미터 해역 “Eolmed”에 10MW급 발전기 3개를 바아지에 실어 건조하는 프로젝트를 추진하고 있다.

〈표 1〉 전 세계에 설치완료된 부유식 수평축 풍력 터빈 현황

S. No.	Year	Project name	Location	Floating platform details	Wind turbine details	Water depth
1	2009	Hywind Demo [17]	Norway	Spar	2.3 MW, Rotor diameter - 85 m	220 m, 10 km offshore
2	2011	WindFloat [18,19]	Portugal	Semisubmersible	2 MW, Rotor diameter - 80 m	45 m, 5 km offshore
3	2013	Kabashima Spar	Japan	Hybrid Spar (steel with prestressed concrete)	2 MW, Rotor diameter - 80 m	-
4	2013	Fukushima Mirai [20]	Japan	Semisubmersible (4-column)	2 MW, Rotor diameter - 80 m	20 km offshore
5	2015	Fukushima Shimpuu [20]	Japan	V-shape Semisubmersible (3-column)	7 MW, Rotor diameter - 167 m	-
6	2016	Fukushima Hamakazae [20,21]	Japan	Advanced Spar	5 MW, Rotor diameter - 126 m	-
7	2018	Floatgen [22]	France	Barge (prestressed concrete)	2 MW, Rotor diameter - 80 m	33 m, 22 km offshore
8	2018	Kincardine Pilot	UK	Semisubmersible	2 MW, Rotor diameter - 80 m	-
9	2019	Hibiki [23]	Japan	Barge (steel)	3 MW, Rotor diameter - 100 m	50 m, 15 km offshore
10	2021	TetraSpar Demo [24]	Norway	TetraSpar	3.6 MW	200 m, 10 km offshore

〈표 2〉 전 세계에 설치완료된 부유식 수평축 풍력단지 현황

S. No.	Year	Project name	Location	Floating platform details	Wind farm details	Water depth
1	2017	Hywind Scotland [25]	Scotland	Spar	30 MW, 5 numbers of 6 MW turbines, Rotor diameter - 154 m	105 m, 25 km offshore
2	2020	WindFloat Atlantic [26]	Portugal	Semisubmersible	25 MW, 3 numbers of 8.4 MW turbines, Rotor diameter - 164 m	100 m, 20 km offshore
3	2021	Kincardine [27]	Scotland	Semisubmersible	50 MW, 5 numbers of 9.5 MW turbines and one 2 MW turbine	60~80 m, 15 km offshore

이에 덧붙여 덴마크에서는 인공 에너지섬을 건설하여 인근 해역에 설치된 해상 풍력 단지에서 생산하는 전력을 모두 모아 통합 관리하는 프로젝트를 추진하고 있으며, 프랑스는 SEM-REV섬을 에너지 연구기지로 전환하여 여러 가지 실험을 수행하면서 인근 해역에 설치된 해상 풍력과 파력 발전에서 생산되는 전력을 이용하여 그린 수소를 생산하는 프로젝트를 시행하고 있다.

우리나라도 위에서 소개한 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획을 실행하기 위하여 울산 앞바다에 “반딧불이”라 명명한 750MW급 해상풍력단지와 1.5GW급 해상풍력단지 “귀신고래” 프로젝트를 기획하고 있다.

FOWT에 대한 분류는 상기한 회전축 외에도 정적 안전성 메커니즘에 따를 수

있다[Collu & Borg 2016]. 즉, FOWT의 복원성은 부력, 발라스트 또는 계류삭으로부터 얻을 수 있는데, 이에 따라 부력으로 복원력을 얻는 반잠수식이나 바지형 플랫폼, 발라스트로 안정화되는 스파 플랫폼 그리고 계류시스템으로 안정화를 도모하는 인장각식 플랫폼으로 분류할 수 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 해상풍력의 플랫폼은 반잠수식과 스파형이 대세이나 해상상태가 온화한 지중해에서는 바아지도 채택되고 있음을 알 수 있다. 한편 해상에서의 거동이 가장 우수한 인장각식에 대한 연구는 수행되었으나[Bae & Kim 2013], 현장에서는 아직 채용되지 않고 있는데, 이는 해저면에 설치하는 콘크리트 앵커와 인장각 파일의 비용이 상대적으로 높기 때문인 것으로 보인다.

부유식 해상풍력 터빈은 매우 복잡한 Multi-body Aero-Hydro-Servo-Elastic 시스템으로, 이 시스템의 설계는 다양한 환경인자 그리고 동적 하중의 특성과 구조 응답 등에 대한 상세한 검토가 필요하다. 부유식 플랫폼은 운전 상태에서 바람과 파도의 영향으로 6 자유도 운동을 한다. 부유식 플랫폼의 운동과 풍력 터빈의 상호작용은 중요한 설계 인자이다. 이를 엄밀하게 분석하려면 공기역학, 유체역학, 구조역학, 터빈 제어 및 계류 동역학 사이의 연성효과를 정확하게 고려하여야 한다[Bae & Kim 2014]. 또한 설계 타당성을 검증하기 위해 정확하고 신뢰할 수 있는 평가방법이 요구된다. 이러한 FOWT의 동적 해석에 대한 다양한 방법들과 이들 간의 관계도가 그림 4에 잘 나타나 있다.

FOWT의 해석과 설계과정에서 고려하여야 하는 주요 인자는 다음과 같다(ABS 2020, DNV 2020).

- 안정성 : FOWT는 운전 및 생존 상태에서 충분한 안정성을 가져야 한다. 따라서 횡동요와 종동요의 최대 각도는 정적 및 동적 하중을 모두 고려하여 일정 각이내, 예를 들어 10도로 제한한다. 또한 안정성을 위해 FOWT의 최소 건현(Freeboard)은 일정치 이상, 예를 들어 10m 이상으로 하여야 한다.
- 고유주기 : FOWT의 플랫폼은 수평동요, 좌우동요, 수직동요, 횡동요, 종동요, 선수동요로 표현되는 6 자유도를 지니고 있다. 다양한 부유식 플랫폼의 주요 운동에 대한 전형적인 고유주기를 표 3에 제시하였다. 플랫폼의 운동은 파도와의 공진을 피하기 위하여 파도의 주기 범위인 5-25초 밖에 있도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 반잠수식이나 스파 플랫폼은 수선면적을 최소화하여 수직동요와 종동요의 고유주기를 입사 파도의 주기보다 길게 설계하며, 반면에 인장각식 플랫폼은 인장각식 계류로 부력을 강압적으로 증가시켜 발

생하는 강한 복원력으로 수직동요와 종동요의 고유주기를 입사 파도의 주기보다 짧아지도록 한다. 이러한 방식으로 반잠수식이나 스파 플랫폼 그리고 인장각식 플랫폼은 파도와의 공진을 회피할 수 있는데, 선박과 같은 바아지형은 그러하지 못하다. 즉, 상기한 부유식 플랫폼 중에서 바아지형이 파도와의 공진에 제일 취약하다. 따라서 바아지는 지중해나 서아프리카 해역 등 환경조건이 우호적인 해상에 한하여 투입되거나 그렇지 않으면 별도의 계류시스템(Mooring system)이나 운동제어장치(Dynamic positioning system)를 구비하여야 한다. 이러한 제약조건에도 불구하고 바아지형을 택하는 이유는 다른 구조물과 비교할 수 없이 큰 적재하중과 상대적으로 저렴한 가격에 있다.

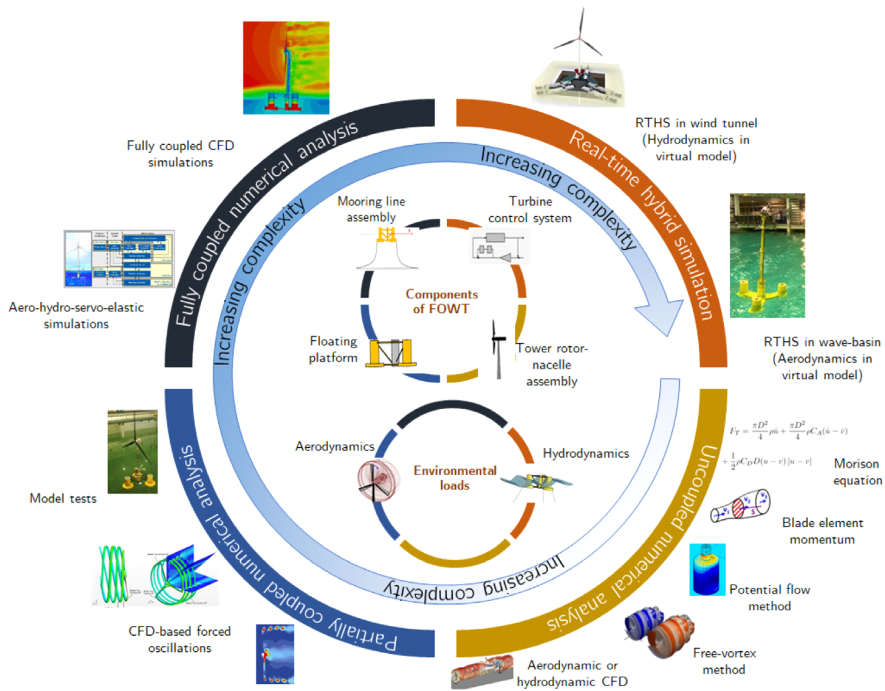


그림 4. FOWT 분석을 위한 다양한 방법 (Subbulakshmi et al. 2022)

〈표 3〉 다양한 부유식 플랫폼에 대한 일반적인 고유주기

S. No.	Degrees of Freedom (DOF)	Spar	Semisubmersible	Barge	TLP
1	Surge/Sway	>100 s	>100 s	>100 s	15-60 s
2	Heave	25-40 s	15-25 s	5-10 s	1-2 s
3	Roll/Pitch	25-40 s	25-40 s	9-16 s	2-5 s
4	Yaw	5-20 s	50-80 s	50-100 s	8-20 s

- **중량** : 부유식 플랫폼의 중량은 FOWT의 건조비에 중요한 영향을 미치므로 플랫폼의 중량을 줄이는 방향으로 설계하여야 한다.
- **환경조건** : FOWT의 설계를 위하여 FOWT가 설치될 해역의 풍황, 파랑 및 조류 등 환경데이터가 확보되어야 한다. 일반적으로 터빈의 허브 높이에서 10분 평균 풍속과 3시간 지속하는 폭풍 조건에 관한 유의파고와 최장 파주기를 사용하여 바람과 파도조건을 시뮬레이션 한다.
- **재현주기** : FOWT의 작동하는 운전조건과 태풍에서 살아남기 위한 생존조건에 대한 설계는 각각 1년과 50년의 재현주기에 해당하는 환경조건을 고려하여야 한다.
- **기타 요소** : FOWT의 해석에는 다양한 풍력 조건(정상 난류 모델, 극한 난류 모델, 방향 변화를 동반한 극한 돌풍, 극한 풍속 모델)과 파도 조건(보통 해상 상태, 과도 해상 상태, 극한 해상 상태) 그리고 조류 조건(보통 조류 모델, 극한 조류 모델)을 고려하여야 하며, 이에 덧붙여 바람, 조류 및 파도의 입사방향의 여러 가지 조합도 고려하여야 한다.
- **설계 대상 상황** : FOWT의 설계에서 운전상황, 운전 중 결함 발생 상황, 생존 상황, 생존상황 중 결함 발생 상황 등을 고려해야 한다. 운전 상황과 운전 중 결함 발생 상황에 대하여 위에 열거한 다양한 환경조건과의 조합을 고려해야 한다. 결국 생존 상황과 생존상황 중 결함 발생 상황에 대하여 재현주기 50년 주기의 극한 환경 조건과 그들 간의 조합도 고려하여야 한다.

이러한 해상풍력터빈의 설계 및 설치에 관한 몇가지 중요한 규정을 아래에 제시하였다.

- 국제전기기술위원회 - IEC TS 61400-3-2 - 풍력에너지발전시스템 - 제 3-2부 : 부유식 해상풍력 터빈 설계 요구사항

■ American Bureau of Shipping - ABS 부유식 해상 풍력 터빈 건설 및 등급 지침

■ Det Norske Veritas - DNVGL-RU-OU-0512 - 부유식 해상풍력 터빈 설치

본 연구는 다음과 같이 구성되었다.

위에 기술한 바와 같이 1장 서론에서는 해상 풍력 발전의 필요성을 논의한 다음 지금까지 설치된 해상 풍력 발전기와 발전단지의 현황을 살펴면서 이들을 터빈축과 부유체에 따라 분류하였다. 2장에서는 해상풍력발전의 구성요소인 부유체, 계류계, 터빈과 로터-발전장치 그리고 이에 대한 제어시스템을 고찰한다. 환경하중을 다룬 3장에서는 이를 유체역학적 방법과 공기역학적 방법으로 나누어 기술하였다. 유체역학적 방법으로 모리슨법, 포텐셜 산란해석법 그리고 계산유체역학법(CFD)를 다루며, 공기역학적 방법으로 날개 모멘텀이론, 보오텍스 격자법 그리고 CFD방법을 다룬다. 4장에서 해상풍력발전기의 응답을 비연성해석, 수치해석 그리고 실시간 하이브리드 시뮬레이션법을 논의한다. 이어서 특이현상의 예로 스파 플랫폼의 Mathieu 형 불안정 운동과 스파 플랫폼의 제어기에 따른 불안정 응답을 분석한다. 마지막으로 해상 풍력에 대한 앞으로의 전망을 간단하게 진단한 다음, 본 연구를 통하여 얻은 결론을 제시하며 끝을 맺는다.

II. 해상풍력의 구성요소

해상풍력(FOWT)의 4가지 주요 구성요소는 부유구조물과 앵커를 포함한 계류 시스템 그리고 타워와 로터-발전장치(nacelle assembly) 및 제어시스템이다. 이 장에서는 이러한 FOWT의 구성요소들을 살펴면서 이들을 해석하는 방법에 대하여 논의한다.

2.1. 부유식 플랫폼

해상풍력 터빈을 지지하기 위해 사용되는 부유식 플랫폼의 다양한 형태는 앞의 그림 3에 나타나 있다. 플랫폼의 개념설계와 초기 치수 결정은 시스템의 유체 정역학 및 동역학적 안전성에 기반을 둔다. 복잡한 구조물의 형상과 경사각도에 따

른 배수 용적을 하나 하나 고려하여야 하므로 계산방법은 단순하지만 많은 노력이 필요하다. 따라서 초기 설계 단계에서는 상대적으로 단순화된 방법을 사용하기도 한다.

FOWT의 플랫폼에 작용하는 힘과 모멘트는 그림 5에 도시하였다. 그림 5의 좌표계 원점 O에 작용하는 환경하중 F_{env} 으로 인한 경사모멘트 M_I 는 다음과 같다.

$$M_I = F_{env}(z_{CP} - z_{MLA}) \cos \theta \quad (1)$$

여기서 θ 는 FOWT의 경사 각도이며, z_{CP} 와 z_{MLA} 는 각각 외력과 계류선에 의한 인장력의 원점에 대한 수직거리이다.

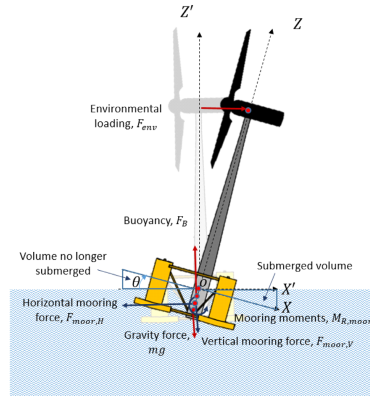


그림 5. FOWT의 종동요에 관한 힘 평형도

한편 경사 모멘트에 대항하는 복원 모멘트 M_R 은 다음과 같다.

$$M_R = \rho g I_y \theta + (F_B z_{CB} - mg z_{CG}) \theta + C_{pitch, moor} \theta \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, I_y 는 종동요에 관한 플랫폼의 관성 모멘트, F_B 는 부력, z_{CB} 와 z_{CG} 는 각각 부력과 질량 중심의 수직거리, m 은 플랫폼의 질량, $C_{pitch, moor}$ 는 종동요에 대항하는 계류강성이다.

윗 식에서 첫 번째 항은 부력에 기인하므로 주로 반잠수식이나 바야지형 플랫폼에서 중요한 요소로 적용되며, 두 번째 항은 발라스트에 기인하므로 주로 스파 플랫폼에 그리고 세 번째 항은 계류선에 기인하므로 주로 인장각식 플랫폼에서

지배적인 인자가 된다.

설계 초기단계에서는 이러한 단순화된 계산을 통하여 바람 등 환경인자에 의하여 발생하는 경사모멘트에 대항하는 복원모멘트가 충분히 확보되는지 그리고 그 범위가 몇 도의 경사각까지 유효한지를 확인하여야 한다. 이러한 접근법은 선박에는 일상적으로 수행하는 작업으로 조선공학분야에 잘 정립되어 있다.

2.2. 계류시스템

계류시스템은 위에서 설명한 바와 같이 인장각식 플랫폼에 작용하는 환경하중으로 인한 플랫폼의 경사모멘트를 상쇄시키는 복원력을 제공하는 경우도 있지만, 대부분의 경우에는 부유식 플랫폼의 수평 이동이 허용 범위 안에 머물도록 억제시키는 역할을 한다. 계류선은 보통 자체중량이 무거운 체인이나 또는 장력은 강하지만 자체 중량은 비교적 가벼운 마닐라삼이나 아라미드와 같은 합성섬유 또는 텐돈 같은 강구조물이 사용된다. 전자의 경우 계류선은 느러진 현수식(Catenary) 형상을 보이며, 후자는 팽팽한 인장식(Taut) 형상을 보인다.

한편 계류시스템은 여러 개의 계류선을 수평면에 배치시키는데, 플랫폼의 여러 곳에 페어리드(Fairlead)로 연결시키는 전통적인 분산형(Spread mooring)과 여러 개의 계류선을 한 곳에 모아 플랫폼에 연결시키는 단일 지점 계류(Single point mooring, SPM)법이 있다. SPM의 대표적인 예가 해저석유 개발용 부유체에 널리 사용되는 터렛계류(Turret mooring)이다. SPM은 파도나 바람 등 환경인자들의 입사각이 바뀌면 플랫폼도 그 방향을 향하도록 유도해주므로(Weathervaning) 별도의 선수동요(Yaw) 제어시스템이 필요 하지 않다. 계류선의 동적 거동을 수치적으로 모사하기 위한 방법은 난이도에 따라 아래에 간략하게 기술하였다.

2.2.1. 준정적 모델 (Quasi-static model)

계류선의 동적 거동이 크지 않을 때 사용하는 방법으로 계류선의 위치와 장력을 현수선방정식을 이용하여 산정한다. 계류선의 거동을 일정한 시간간격을 두고 정적 해석으로 구한 다음 이를 단순하게 시계열로 연결한다. 계류선의 중량과 부력, 계류선의 탄성과 길이방향의 변위 그리고 해저면에서의 마찰력을 포함시킬 수 있다.

그러나 이 모델은 계류선의 관성과 외부 유체력을 고려할 수 없다는 결정적 단점을 지니고 있다. 또한 이 모델에서는 계류선이 한 평면에 있다고 가정하는 제한도 있다. Masciola 등[2013]은 이러한 문제를 극복하기 위해 Multi-segment line elements를 사용하여 계류선을 모델링하였다. 이를 통해 계류선이 보이는 임의 방향으로의 거동을 계산할 수 있도록 하였으며, 실제 계류 시스템에 보다 유효하게 적용할 수 있다.

2.2.2. 집중 질량 모델 (Lumped mass model)

이 모델에서 계류선은 스프링과 댐퍼로 연결된 다물체 요소로 묘사된다. 계류선의 해저면에서의 거동은 마찰 요소를 도입하여 모델링한다. 다물체 시스템의 각 노드에서 동적 평형과 연속성을 나타내는 미분방정식이 얻어지고, 이를 풀어 계류선의 위치와 장력을 도출한다. 집중 질량 모델의 단점은 위에서 지적한 바와 같이 계류선의 굽힘 등 다른 강성요소를 고려하지 않는 것이다. 반면에 이 방법의 장점은 단순함에 비하여 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 터빈 타워도 계류선과 같이 집중 질량으로 모델링하여 일관성을 유지하며 동일한 해석 코드를 사용할 수 있다는 점이다. 이 방법은 단순함과 상대적 유용성 때문에 많은 연구자들이 여러 가지 다양한 문제에 널리 채용하고 있다.

2.2.3. 유한요소모델 (Finite element models)

유한요소법은 위의 방법에서 무시하였던 계류선의 6자유도 강성과 유체력의 작용을 모두 포함하여 시간에 따른 계류선의 3차원 동적 거동을 폭 넓게 다룰 수 있다. 원론적으로는 계류선의 파손으로 인한 스냅 하중(snap loading)과 계류선이 해저면에서 이탈할 때 발생하는 충격력도 다룰 수 있지만 계산 결과가 수렴하는지 그리고 물리적으로 합당한지 세심한 검토가 필요하다[손영준 2012]. 유한요소를 사용하여 계류선을 더 세밀하게 이산화하는 것은 당연히 계산 시간과 비용을 증가시킨다. Hall 등[2014]은 계류선의 모델이 FOWT의 응답에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 대형 플랫폼 운동에 대해 준정적 모델이 풍력 터빈에 대한 손상 및 극한 하중의 계산에서 30%의 오차를 발생할 수 있다고 지적하였다.

2.2.4. 앵커(Anchor)의 종류

앵커시스템은 계류시스템의 유형과 필요한 앵커 용량 및 해저 상태에 따라 결정된다. 체인으로 이루어지는 현수식 계류선은 일반적으로 Drag 앵커에 의해 지지되는데, 이 방식은 오랫동안 널리 사용되어 왔으며 비용이 상대적으로 저렴하다. 그러나 수평지지력을 확보하기 위하여 해저면에 매우 긴 체인을 설치하여야 하며, 또한 태풍 등 극한 해상상태에서 부유체가 멀리 이동하면 큰 수직력을 받은 앵커가 해저면에서 뽑히는 사고가 발생하기도 한다. 한편 Taut 계류시스템이나 인장각식 플랫폼의 텐돈은 앵커에 작용하는 수직 하중이 매우 크므로 Drag 앵커는 사용할 수 없어 대신 값비싼 Drive/suction 앵커 또는 Gravity 앵커가 선택된다. 수직 하중이 매우 큰 경우에는 Suction 앵커가 보다 효과적인 방식으로 알려져 있다. 위에서 언급한 다양한 FOWT용 앵커 시스템은 그림 6에 도시하였다.


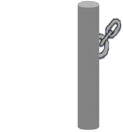
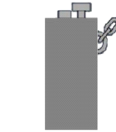

Drag anchor	Driven pile	Suction anchor	Gravity anchor
			
<ul style="list-style-type: none"> • Installation is fast • Capacity depends on soil type, penetration depth achieved • Retrievable 	<ul style="list-style-type: none"> • Pile drivability analysis is required to ensure the capacity • Installation is aided by hammer • Recovery is difficult 	<ul style="list-style-type: none"> • Not suitable for very stiff clay / thick sandy stratum • Capacity is governed by suction anchor size • Installation is aided by under water remotely operating vehicle • Retrievable 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation and retrieval are easy • Capacity is governed primarily by soil type and weight

그림 6. FOWT를 위한 다양한 유형의 앵커시스템 (James & Ros 2015)

2.3. 타워와 로터-발전장치

타워와 로터-발전장치는 풍력 터빈 구조물의 핵심 요소이다. 로터-발전장치는 회전 블레이드, 드라이브 트레인, 발전기 그리고 이를 수용하는 허브로 구성된다. 이러한 장치들은 FOWT에 작용하는 풍하중과 파랑하중으로 인한 구조적 변형을 수용할 수 있도록 설계되어야 한다.

타워와 블레이드와 같은 유연한 구조물의 거동에 대해서는 변위가 크지 않을

때는 선형 모달법(Linear modal representation)을 효과적으로 사용할 수 있다. 타워와 블레이드의 모드 형상은 고유값 분석을 통해 유도되며, 일반적으로 몇 개의 저차 모드만 사용하여도 충분하다. 드라이브 트레인의 동적 거동은 단일 비틀림 모드를 사용하여 표현한다. 나셀과 허브는 유연한 조인트에 연결된 강체로 모델링한다.

한편 선형 스프링과 댐퍼의 결합으로 구성되는 집중 질량 모델은 강성 요소를 모델링하는데 유용하다. 이 접근법은 간단하지만 물리 시스템의 기계적 거동을 선형범위 안에서 잘 반영한다. 한편 FOWT의 다른 구조 모드들 간의 연성을 파악하기 위해서는 보다 정교한 유연체-강체 다물체 시뮬레이션을 사용하여야 한다. 물론 이러한 접근법은 많은 계산 시간과 비용을 요한다.

2.4. 제어시스템

FOWT의 제어시스템은 다양한 센서와 구동기로 구성된다. 제어기의 주요 역할은 센서 측정값을 입력받아 구동기에 명령 신호를 전송하여 발전시스템을 제어하는 것이다. 이를 통하여 바람으로부터 최대 출력을 얻는 동시에 하중 완화와 고장 예방을 포함한 터빈의 안전한 작동에 기여하는 것이다.

풍력 터빈의 작동 영역은 풍속에 따라 보통 4개의 영역으로 분류된다. 각 작동 영역에서의 제어 목표는 다르다. 풍력 터빈의 다양한 작동 영역은 그림 7에 그리고 해당하는 제어 목표는 그림 8에 제시하였다. 영역 1은 풍속이 풍력 터빈을 회전시키기에 충분하지 않는 최소 풍속보다 낮은 경우이다. 터빈은 비활성 상태로 유지되어 전력 생산이 없어 제어할 필요가 없다. 영역 2는 작동시작 풍속과 정격 풍속 사이에 있는 중간 영역이다. 이 영역에서 출력 전력은 풍속이 증가함에 따라 커진다. 최대 출력은 로터의 각속도 또는 토크를 제어함으로써 얻을 수 있다. 영역 3에서의 풍속은 정격 풍속과 Cut-out 풍속 값 사이에 있다. 이 영역에서 풍력 터빈의 출력은 정격 전력으로 일정하게 유지된다. 블레이드 피치 제어기는 피치 각도를 제어함으로써 출력 전력을 일정하게 유지한다. 이는 발전기의 속도를 제한하고 시스템의 기계적 부하를 감소시킨다. 최대 전력 추적 제어기에 대한 자세한 내용은 Kumar와 Chaterjee[2016]에 잘 기술되어 있다. 블레이드 피치 각은 고정되고, 영역 2와 3의 과도 영역에서 일정한 로터 속도를 달성하기 위해 폐쇄 루프 토크 제어 (Closed loop torque control)를 사용한다. 영역 4에서는

고풍속으로 인한 피해를 방지하기 위해 기계식 브레이크를 사용하여 터빈을 정지시킨다. Tuned mass dampers, Tuned liquid column dampers 같은 보조 감쇠 장치가 FOWT이 구조적 반응을 줄이기 위해 사용되기도 한다.

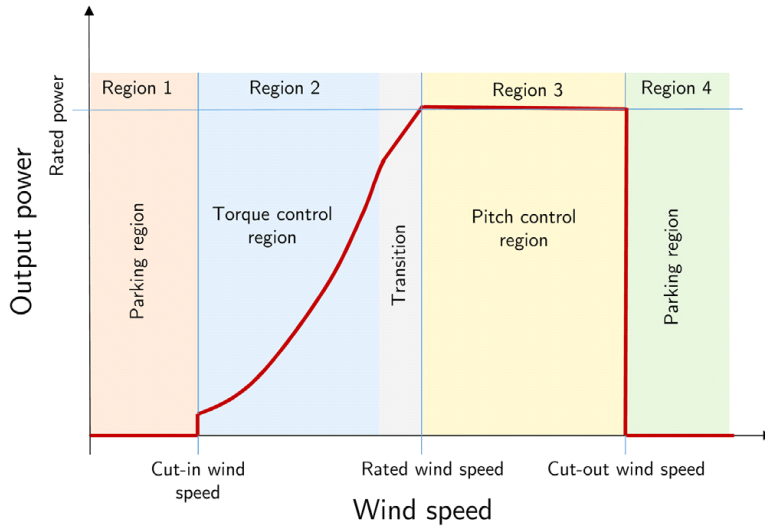


그림 7. 풍력 터빈의 다양한 작동 영역과 이에 상응하는 제어 목표

Generator torque controller	Blade-pitch controller	Vibration controller
<p>Torque controller</p>	<p>Pitching direction</p> <p>Pitch controller</p>	<p>Tuned mass damper</p>
Control objective: Maximize the output power	Control objective: Maintain generator output at the rated power	Control objective: Minimize structural vibrations

그림 8. FOWT의 제어 시스템 (Kumar와 Chaterjee 2016)

기존의 제어 기술은 주로 단일 입력-단일 출력 시스템에 대해 잘 작동한다. 그러나 FOWT를 다중 입력-다중 출력 시스템으로 취급하면 시스템의 성능을 더욱 향상시킬 수 있다. 제어분야에서 잘 알려져있는 고등 제어를 FOWT에 적용한 예로 H-무한 제어(H-infinity control)와 모델 예측 제어(model predictive control) [Lemmer et al. 2015] 등이 있다. 이러한 방법들은 시스템의 근사치를 사용한다. 모델에 포함되지 않는 역학적 특성은 시스템 성능에 영향을 미칠 수 있다. 현재 데이터 기반 제어가 연구되고 있으며, 시스템의 입출력 데이터가 제어 설계에 사용된다. 생물학적 영감 방법(bio-inspired method), 유전 알고리즘 및 강화 학습 기반의 다양한 기계학습 알고리즘을 사용하여 FOWT의 최적 제어를 연구하기도 한다[Brunton & Noack 2015].

III. 하중계산법

FOWT는 파도와 바람에 노출되어 파랑하중과 풍하중을 받아 강체로서의 거동과 탄성체로서의 변형을 나타낸다. 이에 대한 해석을 위하여 우선 FOWT에 작용하는 유체역학적 및 공기역학적 하중을 구하여야 한다. 이 장에서는 FOWT에 작용하는 이들 하중을 산출하는 다양한 방법을 살펴본다.

3.1. 유체역학적 하중계산법

유체역학적 하중은 파 및 조류에 의해 FOWT에 작용하며, 이를 산정하기 위하여 물 입자의 속도와 가속도를 파악하여야 한다. 조류의 시간에 따른 변화는 매우 느리므로 조류에 의한 물입자의 운동은 속도에 국한된다. 그러나 파에 의한 물입자의 운동은 속도와 함께 가속도를 함께 고려하여야 한다.

우선 파에 의한 물입자의 운동은 파이론을 이용하여 산정한다. 여러 가지 파이론이 있는데, 수심이 상대적으로 깊으면 중력파이론을, 그러나 수심이 얇으면 복잡한 천수역파이론을 택하여야 한다. 천수역파를 기술하는 기본방정식이 비선형이어서 다루기가 어려워 특수한 경우를 제하면 일반적으로 중력파이론을 대체 사용한다. 파장에 비하여 파고가 높지 않으면 선형중력파이론을 사용하여도 무방하

나, 태풍과 같이 파고가 높으면 비선형 중력파이론을 사용하여야 한다. 비선형 5차 중력파이론까지 있으나 초기 설계단계에서는 보통 간단한 선형중력파이론을 활용한다. 한편 파고와 파장 또는 파주기 등 파에 대한 계측자료가 있을 때에는 유량함수이론을 사용할 수 있다[최 1980].

이러한 파이론을 이용하여 구조물에 작용하는 조류력이나 파랑하중을 산정하는 방법은 아래와 같다.

- Morison equation
- Potential diffraction theory
- Computational fluid dynamics (CFD)

3.1.1. 모리슨 식

모리슨 식은 원래 구조물의 직경(D)이 파장(L)에 비해 작은 자켓구조물에 작용하는 파랑하중을 산정하기 위하여 개발된 반경험적 식인데[Morison et al. 1950], 이제는 D/L 이 작은 구조물에 폭넓게 사용된다.

$$F_T = \frac{\pi D^2}{4} \rho \dot{u} + \frac{\pi D^2}{4} \rho C_A (\dot{u} - \dot{v}) + \frac{1}{2} \rho C_D D (u - v) |u - v| \quad (3)$$

여기서 F_T 는 구조물의 단위 수직길이에 작용하는 파랑하중, ρ 는 물의 밀도, D 는 원형구조물의 직경, C_A 와 C_D 는 부가질량계수와 점성항력계수, u 와 \dot{u} 는 물입자의 속도와 가속도, v 와 \dot{v} 는 구조물 진동의 속도와 가속도를 나타낸다.

이 식의 첫 번째 항은 물입자의 가속도에 의한 관성력이며, 두 번째 항은 구조물의 진동을 고려한 물입자의 상대 가속도에 의한 부가질량힘이며, 마지막 항은 물입자의 점성에 의한 항력이다. 만약 구조물이 조류에도 노출되면, 위 식(3)의 마지막 항에 조류의 속도를 포함시켜야 하는데, 조류의 방향은 일정하지만 파에 의한 물입자 속도는 주기적으로 방향이 바뀌는 점에 주의하여야 한다. 즉, 파가 파정에 이를 때와 파저에 이를 때 물입자의 속도는 반대방향이 된다.

3.1.2. 포텐셜 산란이론

부유식 플랫폼의 특성 길이(D)가 파장(L)에 비해 상당히 클 때, 즉 $D/L > 0.2$

가 되면 구조물에 의한 파의 산란을 고려하여야 하는데, Morison식은 이를 반영하지 못한다. 이러한 경우 파랑하중은 점성력보다 관성력이 지배적이 된다. 따라서 반잠수식이나 바야지 같은 대형 부유체에 대한 파랑하중은 점성을 무시하고 비압축성, 비회전성이란 가정하에 포텐셜유동으로 간주한 Potential diffraction theory로 산출한다[최 1981].

물입자 운동과 압력을 유도할 수 있는 속도포텐셜함수는 라플라스 방정식의 해로 자유표면과 물체표면 그리고 물체에서 멀어지는 방향으로 파가 전파한다는 경계조건을 만족하여야 한다. 이러한 포텐셜 경계치문제의 해를 구하는 코드는 세계의 여러 연구실에서 개발되어 사용하고 있는데, 그 해법으로 많은 경우 물체 표면을 일정 패널 또는 고차 경계요소로 분할하는 경계요소법이 채용되고 있다. 이 문제는 선박유체역학분야에서 오랫동안 연구하여 지금은 일정한 루틴이 되었으며, 대학이나 연구소가 개발한 자체 코드는 물론 MIT에서 개발한 WAMIT 등 여러 상업용 코드도 판매되고 있다.

주기적 운동을 하는 파도에 관한 유동 또한 주기적이므로 속도포텐셜함수는 $\Phi(x,y,z,t)=\phi(x,y,z)e^{i\omega t}$ 로 표시할 수 있는데, 여기서 (x,y,z) 는 위치를 표시하며 ω 는 파의 주파수를 의미한다. 속도포텐셜함수가 구해지면 파랑하중은 아래 식으로 표시된다.

$$F/M = \rho Re i\omega t A e^{i\omega t} \int_s (\phi_0 + \phi_7) \vec{n} / (\vec{r} \times \vec{n}) dS \quad (4)$$

여기서 F 와 M 은 파도로 인하여 부유체에 작용하는 힘과 모멘트를 나타내며, ρ 는 해수의 밀도 그리고 Re 는 다음 식의 실수부를 의미한다. 한편 A 는 파의 진폭을 ϕ_0 와 ϕ_7 은 각각 입사파 포텐셜과 산란 포텐셜을 표시하며, \vec{n} 과 \vec{r} 은 각각 물체표면에서의 법선벡터와 부유체 중심까지의 거리를 의미한다.

3.1.3. CFD

요즈음에는 전산기의 발달과 함께 수치해석기법이 고도화되어 계산유체역학법(CFD)이 널리 활용되고 있다. 점성은 물론 자유표면 효과 그리고 복잡한 형태의 구조물을 잘 모사하므로 보통 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 수치계산하여 부유식 플랫폼에 작용하는 유체력을 계산하는데, 여러 가지

상용 코드가 있다. CFD를 이용하여 난류유동, 자유표면의 변화, 회절과 방사 현상 등을 정확하게 모델링하려면 수많은 패널이 동원되므로 수치모델링과 계산에 많은 노력과 시간이 필요하다. 일반적으로 RANS 방정식을 풀기 위해 유한체적법(Finite volume method, FVM)에 기반하여 유체영역을 이산화시키지만, 자유표면 영역에서는 유체 체적법(Volume of fluid method, VOF)이 보다 효과적이다.

3.2. 공기역학적 하중계산법

대부분의 대형 풍력 터빈은 로터에 세 개의 날개가 있다. 날개는 파워트레인에 연결되는 루트(Root) 부분에서 높은 비틀 각을 지니며, 그 비틀림은 날개의 길이(Span)방향을 따라 날개 끝(Tip)쪽으로 갈수록 감소한다. 로터 주변에서의 공기의 움직임은 매우 복잡하다. 풍력 터빈 로터 주변의 공기역학적 현상에 대한 이해를 위해 수치 시뮬레이션과 축소 모형 실험을 통한 많은 연구가 수행되었다. 공기역학적 하중과 상호작용 효과는 다음과 같은 방법을 사용하여 접근한다.

- Blade element momentum (BEM) theory (날개 운동량 이론)
- Vortex lattice method (VLM) (보텍스 격자법)
- Computational fluid dynamics (CFD)

3.2.1. 날개 운동량이론

날개 운동량 이론에서는 날개를 길이 방향으로 분할하여 각 단면에 대한 2차원 문제를 다룬다. 3차원 효과는 2차원 단면에 유기되는 유도속도(Induced velocity)를 산정하여 고려할 수 있는데, 종횡비(Aspect ratio)가 큰 날개의 경우 매우 유효한 결과를 얻을 수 있다. 즉, 피치 각이 있는 2차원 날개 단면에 입사하는 유속에 의하여 발생하는 공기역학적 하중, 즉 양력과 항력을 계산하여 날개 단면에 의한 추력과 토크를 산정하고 이를 길이방향으로 적분하여 날개 전체에 작용하는 추력과 토크를 추정하는 계산법은 잘 알려져 있다.

그러나 이 이론은 기본적으로 정상류와 받음각(Angle of attack)이 적다 가정하고 있으므로 이에서 벗어나는 경우에는 이 이론을 적용할 수 없다. 예를 들어 풍력 터빈은 다양한 후류의 영향으로 비정상류에 놓일 수 있으며, 또한 바람이 축방향에서 벗어나면 터빈 주위의 유동을 3차원 문제로 다루어야 하는 경우도 있다.

이에 덧붙여 유입 풍속의 변화와 함께 낮은 회전 속도로 인하여 받음각(Angle of attack)이 매우 커져 Stall 현상이 발생하여 계산할 수 없는 경우도 있다. 이러한 경우에는 동적 Stall 모델로 Beddoes-Leishman 모델, Snel의 모델 그리고 ONERA 모델 등을 사용하여야 한다[Larsen et al. 2007]. 그러나 이런 방법이 너무 복잡하여 IEA Wind Task 23과 30 그리고 그들의 작업 그룹 Offshore Code Comparison Collaborative (OC3, OC4 및 OC5)는 단순화된 접근 방법과 적당한 정도의 정확도를 보이는 수정모델을 사용하였다[Lienard et al. 2020]. 이 수정모델은 초기 설계 단계에서 요구되는 엔지니어링 계산에 적합하여, 또한 FOWT의 Aero-Hydro-Servo-Elastic 연성 해석에 사용되는 다양한 모델링에도 유효하다.

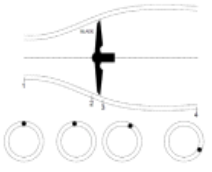
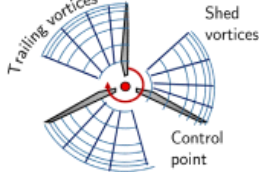
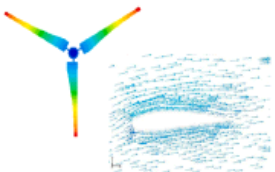
3.2.2. 보오텍스 격자법

보오텍스 격자법(VLM)은 포텐셜유동에 기반하여 개발된 방법으로 Turbulent wake vortex를 효과적으로 기술할 수 있어 풍력 터빈 주위의 유동해석에 응용되고 있다. 대상 물체의 표면과 물체에서 멀리 떨어진 실제 또는 가상의 경계면에 적절한 경계 조건을 부과하고 Green 정리를 활용하여 일정한 순환을 지닌 보오텍스 필라먼트에 의하여 유기되는 속도를 Biot-Savart 적분으로 표시할 수 있다. 한편 보오텍스 격자의 이연이나 변형 등 운동은 시계열 적분으로 추적한다. 기존의 VLM은 높은 받음각에서의 비선형 공기역학적 특성을 고려하지 못하는 한계점이 있었다. 이를 극복하기 위해 개선된 비선형 공식과 순환 강도 보정 기능을 사용하기도 한다[Lee & Lee 2020].

3.2.3. CFD

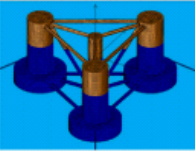
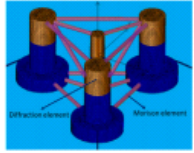
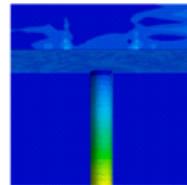
CFD는 구조물/구조물의 부재 주변에 적절한 경계 조건을 부과하고, 유체영역을 이산화시킴으로써 계산 영역의 임의의 지점에서 압력, 유속, 난류강도 등 유동인자를 계산할 수 있다. 대부분의 상업용 및 오픈 코드들은 유한체적법에 기반한 방식을 사용한다. FOWT 주변의 난류 유동에는 다양한 크기와 주파수를 지닌 와류가 수반된다. 유체 영역의 이산화와 난류 모델링은 풍력 터빈의 공기역학적 거동 계산에 큰 영향을 미치므로 신중을 기해야 한다.

Increasing complexity →

Aerodynamics models		
Blade element momentum	Vortex methods	Computational fluid dynamics
		
<ul style="list-style-type: none"> • Best engineering tool till date with use of semi-empirical correction models – good accuracy • Inability to account for 3D/flow interactions across radial elements • Lack of capabilities to consider physics of flow in the wake, yaw misalignment, dynamic inflow, etc., 	<ul style="list-style-type: none"> • Accounts for physics of flow in the wake • Use of potential flow theory • Unsteady nature of wake considered through vortices • Requirement of exhaustive airfoil data under dynamic condition for accurate prediction 	<ul style="list-style-type: none"> • Most accurate with consideration of pressure and viscous effects of flow • Prohibitively expensive for high Reynolds numbers as in case of FOWT • Needs turbulence modelling approaches

(a)

Increasing complexity →

Hydrodynamics models			
Morison equation	Potential flow	Hybrid approach	Computational fluid dynamics
$F_T = \frac{\pi D^2}{4} \rho \dot{u} + \frac{\pi D^2}{4} \rho C_A (\dot{u} - \dot{v}) + \frac{1}{2} \rho C_D D (u - v) u - v $ <p> F_T: Hydrodynamic force C_A: Added mass coefficient C_D: Drag coefficient </p>	 <p style="text-align: center;">Potential flow for all parts</p>	 <p style="text-align: center;">Morison equation for small member, Potential flow for other</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Applicable for slender members • Considers viscous effects • Ignores radiation and diffraction effects 	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable for large components • Considers radiation and diffraction effects • Ignores viscous effects 	<ul style="list-style-type: none"> • Applicable for both large components and slender members • Combines both potential flow theory and Morison equation 	<ul style="list-style-type: none"> • Considers both viscous and radiation, diffraction effects • More time consumption • Free surface effects prediction by VOF method

(b)

그림 9. 난이도에 따른 환경 하중 계산법 (a) 공기역학 (b) 유체역학 (Subbulakshmi et al. 2022)

기본적으로 레이놀즈(Reynolds)수에 반비례하게 유체 영역을 매우 작은 그리드 격자로 이산화시켜 미세한 와류운동을 모사하는 직접 수치 기법(Direct numerical simulation, DNS)이 이상적이지만 계산량이 과다하고 비용이 많이 들어 초기 설계 단계에서는 실용적이지 못하다. 보다 큰 크기의 그리드에서 와류운동을 모사하는 Large eddy simulation(LES) 기법으로 계산량과 비용을 줄일 수 있지만 설계 목적의 FOWT의 공기역학 계산에는 여전히 큰 부담이 된다. Rezaeiha 등 [2019]은 풍력 터빈 주변 유동에 대한 CFD 시뮬레이션을 8가지 난류 모델의 성

능에 대해 종합적으로 분석하고 비교하였다. 그림 9에는 다양한 유체력 및 공기역학적 하중 계산 방법들을 이들의 난이도와 복잡도 정도에 따라 정리하였다.

IV. 해상풍력의 응답 해석

FOWT는 바람, 조류, 파도 등 해상 환경조건에 의하여 크게 영향을 받는다. FOWT의 전체적 거동은 풍하중, 조류하중 그리고 파랑 하중을 모두 포함하고 풍력 터빈과 부유식 플랫폼의 상호작용을 고려한 연성 해석을 수행하여 평가되어야 한다. 그러나 가능한 모든 하중조건 하에 풍력 터빈과 부유식 플랫폼의 상호작용을 고려하여 계산하거나 실험을 수행하는 일은 매우 어렵다. 예를 들어 이러한 물리 실험을 수행하려면 조파기와 조류발생기 그리고 가변 통풍기를 갖춘 해양수조가 있어야 하며, 수조에서 생성되는 환경하중을 받아 물리적 상사성에 따른 구조물의 반응이 나타나도록 적절한 탄성을 지닌 재료를 찾아 구조 모델을 제작하기란 현실적으로 불가능하다. 구조 양식을 적절하게 변경하여 상사성을 최대한 만족하도록 노력하지만 완벽하지 못하고 높은 비용도 요구된다.

이러한 제약을 극복하며 초기에 접근하는 한 가지 방법은 FOWT에 대한 비연성 해석을 시도하는 방법이다. 비연성 해석에서는 다양한 구성 요소와 환경 하중간의 연성 효과를 고려하지 않고 FOWT 구성체의 제한된 거동을 살피는 것이다. 즉, 환경조건으로 바람이나 파도 중에서 한 가지만을 택한다. 예를 들어, 파도의 영향만 고려한다면 조파 수조나 수치 시뮬레이션을 통해 유체역학적 하중을 받아 나타나는 부유식 플랫폼의 응답을 얻을 수 있다. 마찬가지로 공기역학적 반응은 풍동 또는 수치 시뮬레이션을 통해 독립적으로 규명할 수 있다. 풍력 터빈의 공력에 대해서는 육상 풍력 터빈을 대상으로 많은 연구가 수행되었으며, 부유체 또한 지난 반세기 동안 해저자원 개발용 플랫폼으로 사용되어 충분한 수치적 및 실험적 연구가 이루어져 있다.

다음 단계는 부분적으로 연성된 모델에 대하여 해석하거나 물리 실험을 시행하는 방안이다. 이를 위하여 풍력 터빈을 포함하는 부유식 플랫폼에 대하여 공기역학적 하중과 유체역학적 하중을 모두 고려하지만 한 쪽은 단순화시키고 다른 쪽에 초점을 맞추는 방식을 생각할 수 있다. 수치계산에서는 문제를 단순화하여 접

근한다는 장점이 있지만, 물리실험에서는 유효성에 대한 근본적인 의문이 제기된다. 왜냐면 축소모델에 대한 유체역학적 상사법칙은 프루드(Froude)수로 표시되어 실험실에서 실현 가능하지만, 공기역학적 상사법칙은 레이놀즈수에 따르므로 실험실에서 이를 구현하려면 세심한 주의가 요구된다.

유체역학적 관점에 비증을 두는 경우엔 공기역학적 하중은 통풍기를 사용하지 않고 와이어 등으로 풍하중에 해당하는 만큼의 하중을 가하는 방법이 대안이 될 수 있다. 다른 한편 공기역학에 초점을 맞춘 연구에서는 비록 상사법칙을 정확하게 맞추기는 어렵지만 공기역학적 현상의 규명에 초점을 맞추기 위하여 부유식 플랫폼의 운동은 강제동요장치로 모사하고 통풍기를 가동하여 실험을 수행한다.

FOWT의 응답을 정확하게 파악하려면 바람, 조류 및 파랑으로 이루어지는 실제 해상 상태를 고려하고 상호작용을 포함한 부유식 플랫폼과 풍력터빈의 거동을 규명하여야 한다. 그러나 위에서 논의한 바와 같이 유체역학적 상사법칙과 공기역학적 상사법칙이 서로 다르며, 축소 모델에 대하여 두 개의 상사법칙을 동시에 만족시킬 수 없다. 또한 모델에 작용하는 하중과 이에 대한 모델의 응답에 관한 상사법칙을 만족시키는 모델의 제작이 현실적으로 불가능하여 실험적 접근에는 한계가 존재한다. 따라서 물리 실험은 FOWT를 구성하는 부분에 대한 정밀한 고찰과 전체에 대한 정성적 고찰에 의미를 둔다. 시스템이 복잡하고 여러 가지 역학적 문제가 복합적으로 얽혀 있어 이 문제에 대한 접근은 결국 수치적 방법에 의존하는 접근법이 현실적으로 현명해 보인다. 다행히 최근에 컴퓨터의 용량이 급진적으로 증가하였고, 수치기법들이 고도화되어 관련 코드들이 오픈소스로 공개되거나 또는 상용으로 보급되어 수치계산이 활발하게 수행되고 있다.

4.1. 비연성 접근

4.1.1. 유체역학적 연구

부유체에 대한 유체역학적 접근은 위에서 언급한 바와 같이 조선해양공학분야에서 오랫동안 연구하여 이제는 루틴으로 정립된 과제이다. 즉, 전통적인 조선공학에서는 해상에서 파랑을 맞으며 일정한 속도로 항진하는 선박의 내항성능이 주된 문제가 되어 포텐셜이론에 근거한 해석을 그리고 조파기가 장착된 수조에서 실험을 통하여 연구하였다. 반면에 FOWT에 사용되는 부유체는 선박과 달리 전

진속도 없이 해상에서 일정 반경 내에 머물러야 하므로 운동성능은 물론 위치안정성이 중요하다.

따라서 6자유도 동요를 억제하기 위하여 반잠수식과 스파플랫폼은 같은 배수량의 바아지에 비하여 수선면적을 대폭 줄여 수직동요와 종동요의 주기를 20초보다 길게 하여 파도와의 공진을 회피한다. 이에 대한 댓가는 적재하중이 크게 줄어든다는 점이다. 반면에 다수의 텐돈으로 선체를 끌어내려 고착시키는 인장각식 플랫폼은 수직방향 고유주기를 오히려 짧게 하여 역시 파도와의 공진을 피하도록 고안되었다.

이들 구조물에 대한 유체력은 앞 장에서 살핀 바와 같이 포텐셜이론에 근거한 경계치문제로 수식화하여 구한다. 구조물의 표면을 충분한 숫자의 격자로 이산화시킨 다음 각 격자에 특이점을 분포시켜 속도포텐셜을 수치적으로 구한다. 속도포텐셜이 구해지면 유체영역내 임의점에서의 유속과 압력을 계산할 수 있으며, 부유체에 작용하는 파랑하중과 부가질량 및 동유체감쇠력을 산정하여 운동방정식에 대입하여 부유체의 파주파수에 따른 선형 6자유도 응답을 구한다.

한편 부유체는 해상에서 6자유도 운동 뿐 아니라 표류운동도 하므로 이를 억제하기 위하여 계류시스템이 필요하다. 물체에 작용하는 표류력은 앞에서 이미 구한 속도포텐셜로 비선형 항을 계산하여 산정하며, 계류력은 선체와 연결된 계류계의 끝단에 작용하는 인장력으로부터 산정한다. 실제 해상에서 보이는 부유체의 거동은 JONSWAP 또는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼과 같은 해상 상태에 대한 스펙트럼으로부터 입사파의 시계열을 생성하여 실제 해상을 모사하고 이에 반응하는 부유체의 거동을 시뮬레이션한다.

지금까지 설치된 FOWT의 다수는 WindFloat, DeepCwind와 같이 운동성능이 보다 안정적인 반잠수식 플랫폼을 하부구조물로 사용하여 이에 대한 유체역학적 해석도 많이 이루어졌다. 한편 CFD를 이용하여 수치 조파 수조를 만들어 규칙파에 놓인 OC5 DeepCwind 반잠수식에 대한 계산을 수행하여 다른 해석 결과와 비교하였다[Bruinsma et al. 2018]. 또한 수조실험으로 해석결과를 검증하는 연구도 수행되었는데, Simos 등[2018]은 1.5MW 풍력 터빈이 장착된 HiPRWind 반잠수식의 1:20 축소모형의 규칙파 및 불규칙파 중에서의 거동에 대한 실험을 수행하였다.

4.1.2. 공기역학적 연구

비연성 공기역학적 접근은 부유체와의 연성을 무시하고 날개 회전 유동, 날개-타워 상호작용, 후류 영향 등과 같은 공기역학적 현상을 규명하는 것으로 항공공학분야의 전통적 과제이다. 위에서 논의한 바와 같이 이 문제에 접근하기 위하여 날개모멘텀이론이나 보오텍스격자법을 사용할 수 있다. 그러나 날개 사이 그리고 날개-타워의 간섭효과나 후류의 영향을 제대로 분석하려면 CFD가 효과적이다.

CFD 시뮬레이션은 FOWT를 실물 크기로 직접 모델링할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 실물 크기의 FOWT 시스템의 수치해석을 수행하기 위하여 유동에 대한 세밀한 모델링이 요구된다. 예를 들어 Pinto 등[2020]은 프루드법에 따라 1/50의 상사비로 축척한 모델과 실물 크기의 FOWT를 비교하여 바람의 유동을 연구하였다. 즉, 전단 응력 이송(SST) $k-\omega$ 난류모델을 도입한 RANS를 STAR CCM+를 이용하여 수치계산하여 공기역학적 매개 변수를 비교하였다. 실물과 축척 모델에 대한 출력과 추력 계수는 비슷한 것으로 나타났다. 한편 Tran 등[2012]은 CFD를 이용하여 NREL 5MW급 풍력 터빈의 설계 하중을 분석하였다. 이 연구에서는 ANSYS-FLUENT를 이용하여 SST $k-\omega$ 로 난류를 모델링한 RANS를 수치 계산하였다. 움직이는 로터 블레이드는 다중 기준 프레임과 슬라이딩 메쉬 기술로 이산화시켰다. 공기역학적 출력과 추력은 정상 풍속과 극한 운전 돌풍 범위에서 평가하였다. Kono 등[2017]은 Improved delayed detached eddy simulation으로 난류를 모델링한 ANSYS-FLUENT를 사용하여 날개-타워 간의 상호작용을 수치적으로 조사하였다. 수치 계산은 Tip speed ratio가 3, 6 그리고 10인 세 가지 경우에 대하여 수행되었다. 날개 회전으로 인하여 타워에 작용하는 공기역학적 하중이 크게 변화함을 지적하였다.

한편 풍력 터빈의 축소 모형에 대한 풍동 실험으로 터빈 주위 유동과 후류를 관측하고 동적 하중을 예측할 수 있다. 여러 실험을 통하여 풍동에 유입되는 바람의 특성은 물론 모델에서 발생하는 팁보오텍스가 풍력 터빈의 공기역학적 하중과 전력 생산에 상당한 영향을 미침을 밝혔다[Chamorro & Port-Agel 2009].

4.2. 수치적 접근

FOWT의 비연성이나 부분적 연성 해석은 공기역학 또는 유체역학 중 어느 하

나의 근사치를 따르기 때문에 풍력 터빈과 부유식 플랫폼 간의 실제 상호작용을 정확하게 규명하기에는 충분하지 않다. 따라서 풍하중과 파랑하중 조건에서 실제 거동을 연구하려면 FOWT에 대한 완전 연성 모델을 수립하여야 하지만 위에서 지적한 바와 같이 물리실험은 상사법칙으로 한계를 지니며, 해석법 또한 대상물의 복잡한 형상과 여러 가지 역학적 원리가 공존하는 복잡성 때문에 완벽한 접근이 어렵다. 따라서 연성된 풍하중과 파랑하중 조건에서 FOWT이 보이는 거동을 규명하려면 결국 CFD 시뮬레이션 또는 Fast, Bladed, HAWC2 등과 같은 수치 시뮬레이션 도구를 사용하여 수행하여야 한다.

비정상 공기역학을 모델링하기 위해 UALM이 개발되었으며, 이 코드는 부유식 플랫폼의 운동이 블레이드에 미치는 영향을 포함하고 있으며, 부유식 플랫폼 운동과 풍력 터빈 간의 상호작용을 규명하기 위하여 오픈소스 CFD 코드들이 활용되었다 [Cheng et al. 2019]. Liu 등[2017]은 이 코드를 이용하여 OC4 DeepCwind 반잠수식 FOWT의 연성 거동을 시뮬레이션하였다. 이때 슬라이딩 메쉬 기법으로 이산화하여 시뮬레이션하였는데, 단순화된 모델이나 실험에서 얻지 못한 풍력 터빈 블레이드 주변의 유동장과 풍력 터빈 후류의 보오텍스의 흐름과 영향을 밝힐 수 있었다. 한편 Zhang와 Kim[2018]은 OC4 DeepCwind 반잠수식 플랫폼에서 지지되는 5MW 풍력 터빈에 대해 연성 해석을 수행했다. 블레이드의 팁보오텍스 분출, 타워와 블레이드간의 상호작용, 후류 등 고도로 복잡한 현상들이 연성 해석을 통해 수치적으로 관찰되었다. 플랫폼의 움직임과 함께 타워와 터빈 주변의 보오텍스 확산도 확인하였다. 전력 출력은 터빈의 추력보다 플랫폼의 움직임에 더 민감함을 밝혔다. 또한 비정상 블레이드 팁보오텍스와 플랫폼 수평 운동으로 인한 타워와의 강한 상호작용이 나타남을 지적하였다. 후류 상호작용은 대부분 플랫폼 수평운동의 주파수와 진폭의 함수임이 밝혔다.

4.3. 실시간 하이브리드 시뮬레이션(RTHS)

FOWT의 모델은 공기역학적 및 유체역학적 하중을 받을 때 FOWT의 동적 거동을 적절하게 나타내어야 한다. 또한 모델은 공기-유체-탄성 간의 동적 연성을 반영할 수 있어야 한다. 이에 대한 모델링은 수치 모델과 물리 모델 등 두 가지 방식으로 접근할 수 있다. 수치 모델은 FOWT의 설계에 널리 사용되나 궁극적으로는 실험을 통한 검증이 필요하다. 그러나 위에서 논의한 바와 같이 물리 실험

에는 요구되는 상사법칙을 완벽하게 만족시킬 수 없는 한계가 있으며, 또한 한정된 실험 설비와 막대한 비용으로 쉽게 접근하기 어렵다. 실시간 하이브리드 시뮬레이션은 이 두가지 접근법의 장점, 즉 계산 모델의 효율성과 실험의 실용성을 결합함으로써 물리 실험의 한계를 일정 부분 대체할 수 있다[Verma & Sivaselvan 2019].

HIL(Hardware-in-the-loop) 테스트 또는 동적 하위 구조화라고도 불려지는 실시간 하이브리드 시뮬레이션은 복잡한 공학 시스템의 동적 거동을 연구하기 위해 물리 시스템과 가상 시스템을 나타내는 컴퓨터 모델을 실시간으로 연계하여 구성된다. 물리 시스템의 응답은 센서로 측정되어 이를 컴퓨터 모델에 전달한다. RTHS의 구성도는 위의 문헌에서 인용하여 그림 10에 전제하였다. 한편 제어 시스템은 전체 피드백 시스템의 안정성이 보장되도록 신중하게 설계되어야 한다. FOWT 시스템에 적용되는 분할 방식에 따라 다양한 RTHS 구성이 가능하다.

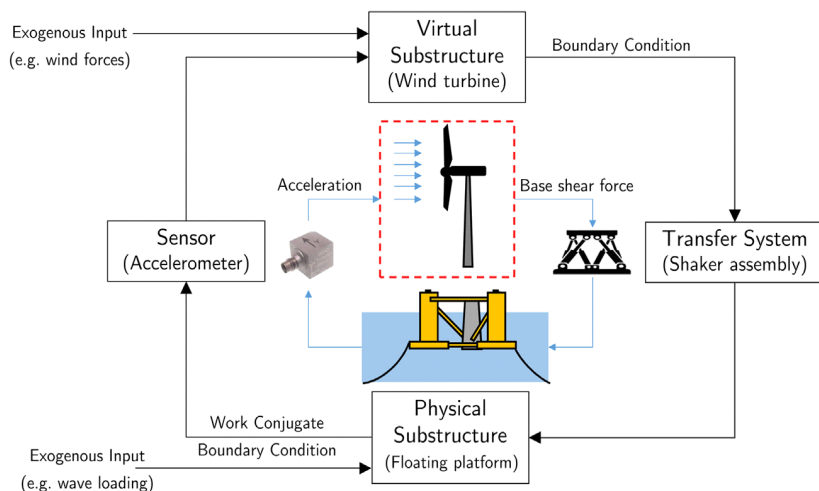


그림 10. RTHS의 개념 블록도 (Verma & Sivaselvan 2019)

4.3.1. 공기역학문제를 가상시스템으로

이 형태의 RTHS에서는 공기역학이 컴퓨터 모델에서 처리되는데, 물리 시스템과의 결합 위치에 따라 두 가지 다른 접근이 가능하다. 첫 번째 접근 방식에서는 로터에 작용하는 공기역학적 하중을 수치적으로 계산하고 이를 전체 터빈의 관성과 탄성을 대표하는 물리적 모델에 적용한다. 두 번째 접근 방식으로는 풍력 터

빈과 타워 등 전체를 가상 시스템으로 처리한다.

첫 번째 방식인 공기유동-로터 연계 모델에서는 로터 동역학과 블레이드 피치 및 발전기 토크 제어에 대한 영향도 고려한다. 컴퓨터에서 로터는 강제로 모델링하고, 이에 작용하는 공기역학적 하중은 수치계산으로 구하여 서보모터를 이용한 구동 메커니즘을 통하여 타워에 적용된다.

두 번째 방식인 타워-베이스 연계 모델에서는 컴퓨터로 모델링한 타워의 관성력을 조파 구조에서 부유식 플랫폼에 전달한다. 여기서 풍력 터빈을 단일 자유도 시스템으로 모델링한 단순한 경우가 제시되었고 가상 RTHS의 개념을 시연하는데 사용되었다. 부유체의 파랑 하중에 대한 응답은 수조에서 실험을 통하여 구하거나, 또는 스프링과 직렬로 연결된 DC 서보모터를 사용하여 모사할 수 있다. 이 경우 당연히 예측의 정확도에 주의하여야 한다.

Hall 등[2018]은 이러한 두 가지 접근 방식을 비교하였다. 이 연구에서 두 번째 방식인 타워-베이스 결합 기반의 RTHS에서는 응답 측정 센서의 밴드폭과 지연시간(latency)에 대한 세심한 배려가 필요함을 지적하였다.

4.3.2. 유체역학문제를 가상시스템으로

이 유형의 RTHS에서는 부유식 플랫폼과 유체동역학이 가상 시스템으로 처리된다. 한편 물리 시스템은 풍동 내부에서 공기역학 하중에 노출된 풍력 터빈의 축소 모델로 구성된다. 이 유형의 RTHS에 대한 많은 연구는 풍동 실험을 보완하면서 실제 풍력발전기를 모사할 수 있도록 로터의 피치각 조정과 타워모델의 수평운동이 가능하게 만들었다. 이를 통하여 블레이드와 피치 제어가 가능한 풍력 터빈의 축소 모델을 풍동에서 실험할 수 있었으며, 다양한 바람과 파도 등 서로 다른 운전 조건하에서 풍력 터빈에 대한 실험을 수행하였다[Fontanella et al. 2019].

4.4 특이 응답

지금까지 기술한 FOWT의 응답과 관련하여 특이한 현상으로 특별한 주의가 요구되는 문제를 간략하게 살피고자 한다.

4.4.1. 스파플랫폼의 불안정 거동

앞 서론에서 살펴 본 바와 같이 부유식 플랫폼으로 스파 플랫폼이 채택되기도 한다. 이 부유체의 주요 제원은 보통 직경이 20여 미터이고 길이가 150미터 이상에 이른다. 직경이 작아 파랑하중이 상대적으로 적어 선형 운동이 크지 않은 장점을 지니지만 길이가 길어 조류의 영향을 크게 받아 부유체가 수평방향으로 밀릴 수 있다. 이러한 조류력과 파도의 비선형 표류력에 의한 수평 이동을 억제하기 위하여 계류시스템을 설치하여 위치안정성을 도모한다. 그러나 수직운동의 고유주기와 종동요의 고유주기가 배수관계가 되면 종동요가 매우 큰 수직동요를 야기시키는 소위 말하는 Mathieu형 불안정 상태가 발생하기도 한다[Roh et al. 2005]. 수직동요와 연성된 종동요 방정식은 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$\eta_{5tt} + 2\zeta\omega_{n5}\eta_{5t} + \omega_{n5}^2\left(1 - \frac{\eta_3}{2GM}\right)\eta_5 = f(t) \quad (5)$$

윗 식에서 η_3 과 η_5 는 각각 수직동요와 종동요의 진폭을 나타내며, 아랫 첨자 t 는 시간에 대한 미분을 의미한다. 한편 ζ , ω_{n5} 는 종동요에 대한 감쇠계수와 고유주파수를 표시하며, GM 은 스파플랫폼의 메타센터 높이를 그리고 $f(t)$ 는 외력을 의미한다.

외력이 작용하지 않는 이 식에 대한 안정성을 해석하면 아래 그림 11과 같은 결과를 얻게된다. 이 그림의 수평축은 종동요와 수직동요의 고유주파수비이고, 수직축은 입사파고와 메타센터높이의 비이다. 그 그림을 살펴보면 고유주파수 비가 0.1에서 0.7 범위에 놓이면 매우 낮은 파고의 파가 입사하여도 스파 플랫폼은 불안정한 운동을 할 수 있음을 알 수 있다. 이를 확인하기 위하여 전형적인 스파 플랫폼의 1/100모델을 아크릴로 제작하여 2차원 수조에서 실험을 수행한 결과 초기에는 수직동요와 종동요가 비교적 안정적 거동을 보이다가 시간이 지나면서 서서히 종동요가 증가하더니 갑자기 그 에너지가 수직동요로 옮겨져 수직운동이 심하게 나타나는 현상을 확인하였다. 그 다음엔 전형적 스파가 아닌 트러스 구조를 지닌 스파에 대한 모델을 만들고 하면에는 디스크를 달아 수직동요에 대한 감쇠력을 크게 증강시켰다. 그러나 이에 대한 실험에서도 불안정 영역에서 위에서와 같은 Mathieu형 불안정 운동이 확인되었다. 따라서 스파 플랫폼을 설계할 때 처음부터 이 관계를 세밀하게 조사하여 배수관계를 피하도록 플랫폼의 제원을 조절하여 설계하여야 한다.

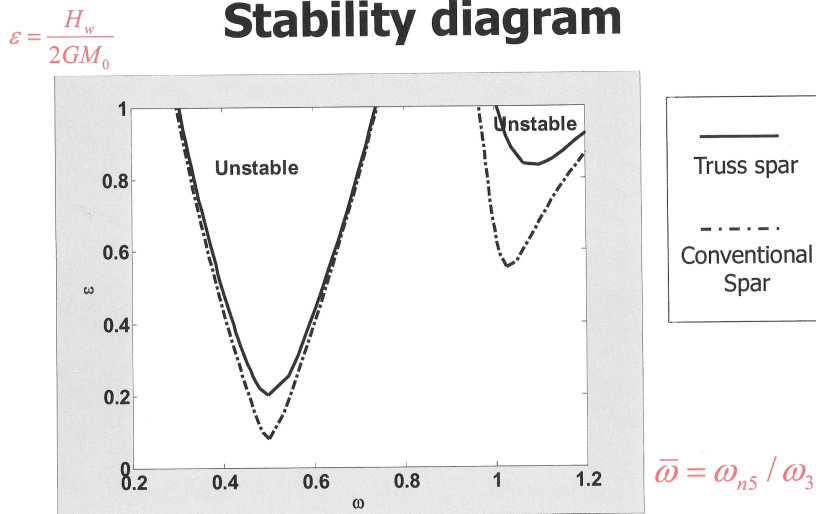


그림 11. 스파플랫폼 운동의 안정성 (Roh et al. 2005)

4.4.2. 음의 댐핑에 대한 논쟁

Larsen & Hanson[2007]는 스파 플랫폼에 탑재된 5MW급 풍력 발전기 Hywind의 날개 피치에 대한 제어 연구를 수행하는 과정에서 피치 제어주파수가 타워의 최저 고유진동수보다 높으면 타워의 운동이 불안정해져 크게 나타남을 수치 예제를 통하여 발견하였다.

그림 12에서 수직축은 아래에서부터 타워의 수평운동, 날개의 피치각, 로터의 회전속도 그리고 맨 위는 풍속을 표시한다. 왼쪽 그림은 육상 풍력 발전의 경우로 타워의 고유진동수가 0.5Hz, 피치주파수가 0.1Hz인 경우이고, 가운데 그림은 육상 풍력에 사용했던 제어를 해상 풍력 발전에 그대로 적용한 경우로 플랫폼의 종동요 고유진동수는 0.05Hz이나 피치주파수가 0.1Hz, 즉 피치주파수가 플랫폼의 종동요 고유진동수보다 높은 경우이다. 그리고 오른쪽 그림은 가운데 그림과 같은 해상 풍력 발전으로 플랫폼의 종동요 고유진동수는 0.05Hz이나 피치 제어주파수가 0.04Hz이다.

이 수치계산의 예에 뚜렷하게 나타나 있듯이 피치 제어주파수가 플랫폼의 종동요 고유진동수보다 낮으면 플랫폼의 수평운동은 초기에 심한 변동을 보이지만 곧 안정세를 보인다. 로터의 회전속도도 같은 경향을 보인다. 그러나 가운데 그림에

서 볼 수 있듯이 피치 제어주파수가 플랫폼의 중동요 고유진동수보다 높으면 피치각을 비롯하여 로터의 회전속도와 플랫폼의 운동이 대략 0.067HZ의 주기로 시간에 따라 점점 크기가 커지는 불안정한 상태를 보인다.

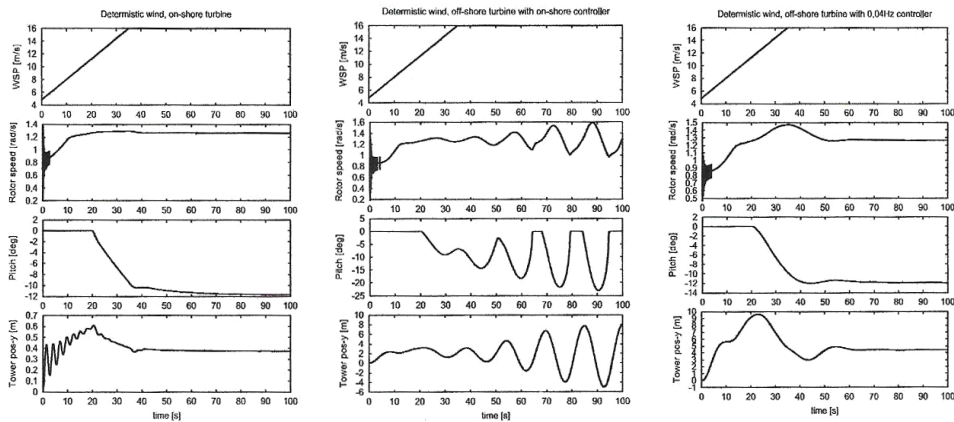


그림 12. Hywind에 대한 피치제어와 타워의 운동응답 (Larson & Hanson 2007)

이 논문의 저자는 이에 대한 원인을 추력이 풍속의 증가에 따라 감소하면 추력이 타워에 음의 댐핑으로 작용하여 플랫폼의 운동이 불안정해진다고 진단하였다. 이에 따라 후속 연구자들도 이러한 불안정 상태가 나타나면 모두 그 원인을 음의 댐핑이라 주장하고 있다. 그러나 위의 그림을 보면 풍속은 계산이 시작되면서 선형적으로 증가하여 35초 이후부터는 정속인 16m/s로 일정하다. 즉, 풍속은 곧 정속에 다달아 변화가 없으나 날개의 회전에 따른 후류로 인하여 순간적으로 풍속이 감소할 수 있으나 지속적이지는 않다. 그러나 무엇보다 근본적으로 ‘음의 댐핑’이란 개념이 물리적으로 합당한지 의문스러우며, 또한 음의 댐핑에 해당하는 공력이 거대한 타워와 플랫폼에 불안정하게 큰 운동을 야기할 정도인지 의심스럽다. 또한 플랫폼의 불안정 진동의 주파수와 피치주파수는 어떤 관계를 갖는지 물리적 원인을 이해하기 어렵다.

이 문제를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 Orcina사의 OrcaFlex 라는 소프트웨어를 사용하여 위와 같은 경우에 대한 계산을 수행하였다. 이 프로그램은 기본적으로 시간영역에서 부유체와 계류시스템의 연성거동해석이 가능한 소프트웨어인데, 이에 풍력터빈 모듈을 도입하여 상부 구조물을 모델링함으로써 부유식 풍력을 계산하였다. 다만 이 프로그램에서는 날개의 피치제어를 입력값으로 처리하

지 않고 자체적으로 최적조건을 찾아 시행하여 피치제어의 주파수를 알 수 없는 문제를 지니고 있다.

일단 이 프로그램으로 위의 논문에서 사용한 Hywind 스파플랫폼을 모델링하여 구조물을 자유진동시켜 고유주파수 0.035Hz와 0.475Hz를 얻었다. 전자는 플랫폼의 종동요 고유진동수로 보이고, 후자는 타워의 굽힘진동수로 보인다. 즉, 위의 논문에서 설정한 플랫폼의 종동요 고유진동수 0.05Hz와는 차이를 보인다. 위에서와 같이 바람이 선형적으로 증가하여 35초 후에는 정속 16/m에 도달하는 환경에서 날개의 피치제어에 의한 응답을 500초까지 계산하여 그 결과를 아래 그림 13에 제시하였다.

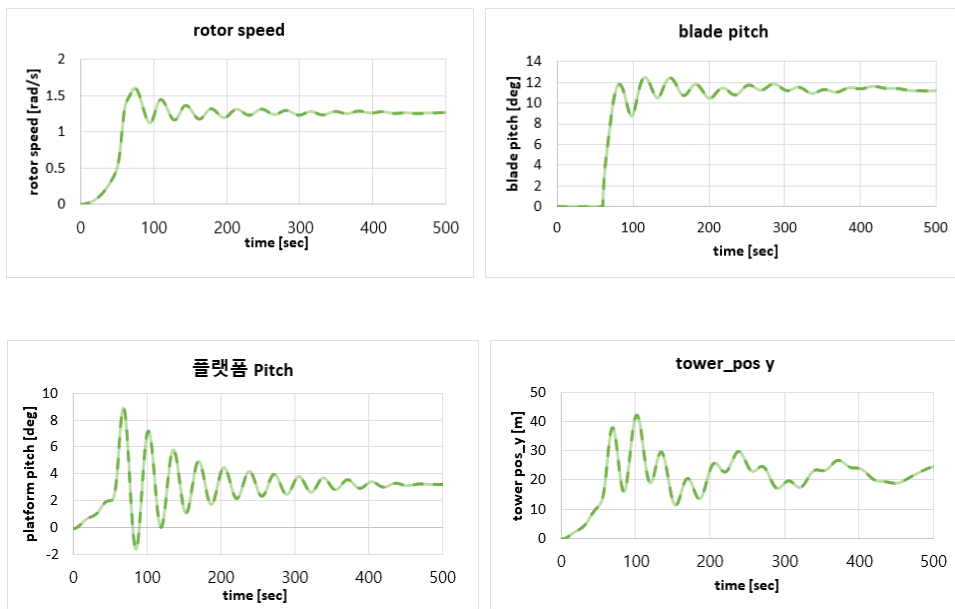


그림 13. OrcaFlex를 이용한 Hywind 스파플랫폼의 날개 피치제어 시뮬레이션

본 계산결과와 앞의 그림 12의 오른쪽 그림을 비교하면 로터의 스피드와 날개의 피치각이 앞에서는 50초 후에 12.5rad/s 과 -12도에 수렴하나, 본 계산에서는 150초가 지난 다음에야 이들 값에 수렴하나 그 후에도 비록 작은 진폭이지만 여전히 진동을 이어가고 있다. 여기서 날개 피치각의 부호가 반대로 나타나 있는데, 이는 프로그램에서 정한 방향이 위에서와 반대이기 때문이다. 더욱 심각한 차이는 타워의 위치에서 나타나는데, 앞에서는 50초 후에 타워의 위치가 4미터로 고

정되지만 본 계산에서는 계산을 수행한 500초 동안에 작은 진폭의 진동과 함께 지속적으로 서서히 변화하는 모습을 보이고 있다. 마지막 그림은 플랫폼의 중동요를 보이고 있는데, 시간이 지나면서 서서히 4도에 수렴하고 있다. 이러한 차이의 원인을 정확하게 진단할 수 없으나, 수치결과로 보아 각 프로그램에서 사용한 제어기의 차이에 기인한 것으로 보인다.

위의 계산에 사용한 프로그램의 특성상 적용된 피치제어기의 주파수를 알 수 없으나, 제어주파수의 차이에 의한 영향을 고찰하기 위하여 그림 13에 적용된 기준주파수의 0.5, 0.75 그리고 1.25와 1.50 등 4가지 서로 다른 제어주파수에 대한 계산을 수행한 결과를 그림 14에 도시하였다.

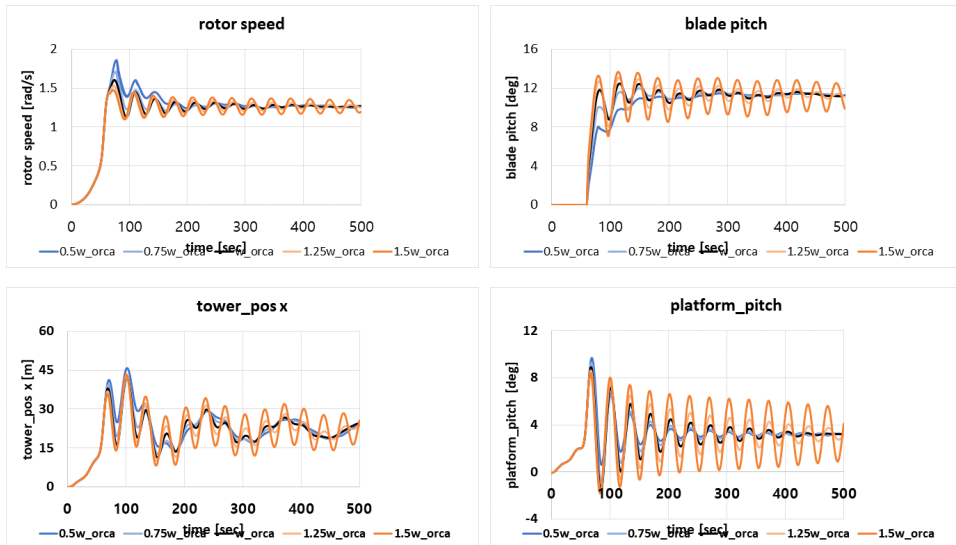


그림 14. OrcaFlex를 이용한 Hywind 스파플랫폼의 날개 피치제어 시뮬레이션

위의 그림에서 검정색 선이 기준주파수(w_{orca}), 파랑색이 기준주파수의 50%($0.5w_{orca}$), 연두색이 기준주파수의 75% 주파수를($0.75w_{orca}$) 나타내고, 분홍색 선이 기준주파수의 1.25배 ($1.25w_{orca}$) 그리고 붉은색 선이 기준주파수의 1.5배의 주파수로 날개의 피치를 제어한 수치 결과이다. 일반적으로 5가지 경우 모두 비슷한 양상을 보이지만 제어주파수가 기준주파수에서 멀어지면 수치 결과도 기준주파수의 결과와 차이가 커진다. 특히 제어주파수가 기준주파수보다 높으면 결과의 차이가 명확하게 벌어진다. 그러나 본 계산의 범위안에서는 시간에 따라 결과가 발산하는 불안정한 경우는 나타나지 않는다. 기준주파수가 열

마인지 알 수 없어 단정하기 어려우나 여기서 내릴 수 있는 결론은 소위 말하는 음의 댐핑 문제라기 보다는 제어기의 특성에 따른 결과일 가능성이 더 높아 보인다. 이에 대하여 PID제어가 아닌 최적제어기나 고차제어기를 이용하여 보다 깊은 연구가 요구된다.

V. 전망

해상 풍력은 탄소배출 넷제로(NZE)의 목표연도인 2050년까지 지속적으로 성장할 것으로 전망된다. 즉, 전 세계 해상 풍력 발전량은 2020년의 6.9GW에서 2030년에는 228GW로, 그리고 2050년에는 거의 1,000GW로 증가되어 전체 풍력의 17%가 될 것으로 예측되기 때문이다. 이러한 성장은 해상 풍력이 양적으로는 다른 어떤 대체에너지원과 비교할 수 없이 대용량이란 점(원자력은 제외)과 질적으로는 해상 풍력으로 생산된 전력을 새로운 대체 에너지원으로 부상하고 있는 수소를 현장에서 생산하면 탄소를 전혀 배출하지 않는 완벽한 대체에너지라는 점이다. 이러한 전망은 해상 풍력이 바람의 특성상 전력 생산이 일정하지 않고, 또한 생산된 전력을 해저 케이블을 통해 인근 해안으로 전송하는 기술적 및 경제적 문제를 해결한다는 점에서 힘을 얻고 있다. 즉, 해상 풍력에서 생산되는 불규칙한 전력을 저장하지 않고 바로 플랫폼에서 전기분해방식으로 그린 수소를 생산하는 방안이 프랑스를 비롯한 EU국가들에서 진지하게 검토되고 있다. 수소는 대체 에너지원 중에서 저장과 이송이 비교적 용이하므로 생산된 수소를 플랫폼에 저장해 두었다가 전용운송선으로 인근 연안으로 이송하는 방법에 기술적 어려움이 없어 실현가능성이 매우 높아 보인다.

이런 관점에서 앞으로 해상 풍력은 지속적으로 성장할 것으로 보인다. 수심이 얕으면 경제적으로 우수한 고정식 하부구조물이 선호되지만 대용량의 발전이 요구되면서 투입 수역의 수심이 깊어져 부유식이 대안으로 대두되었다. 부유식을 선호하는 다른 한가지 이유는 유럽에서 운용한 경험에 의하면 고정식은 연간 이용율이 30-40%에 불과하지만 부유식은 60%에 이르러 효율성이 높다는 점이다.

특히 반잠수식 플랫폼은 넓은 갑판면적과 상대적으로 적재하중이 커 더욱 선호 될 것으로 전망된다. 즉, 반잠수식 플랫폼은 운동성능이 뛰어나고 갑판 면적이 넓

여러 대의 풍력 터빈을 수용하는 풍력 단지로 활용될 수 있다. 또한 넓은 갑판에 수소생산시설을 설치하여 생산된 해상 풍력의 전력을 활용하는 진정한 의미에서 제로 탄소배출을 달성시키는 대체 에너지 시스템이기 때문이다.

이러한 해상 풍력 시스템을 안전하게 건설하여 운영하기 위하여는 모든 환경조건하에 풍력 터빈 날개와 타워의 탄성 거동 그리고 여러 개의 터빈이 설치되는 경우 상호 간섭효과는 물론 부유체의 거동을 정확하게 규명하는 것이 매우 중요하다. 즉, 환경인자의 가변성과 복합성을 포함하여 완전 연성 해석과 실험적 검증의 중요성이 높아질 전망이다. 우리나라는 오랫동안 많은 육상 풍력을 제작한 경험을 지니고 있으며, 해저 자원개발용 반잠수식 플랫폼을 세계에서 제일 잘 건조한 실적을 지니고 있다. 운송과 설치에 몇 개의 글로벌 기업이 독점하는 분야이나 우리나라도 제한된 능력과 경험을 지니고 있어 성장할 가능성을 지니고 있다. 이러한 여러 가지 상황을 종합적으로 살펴보면 우리나라는 앞으로 부유식 해상풍력 분야에서 세계적 경쟁력을 지닐 수 있다는 판단이다.

한편 부유식 해상풍력분야에 관련된 앞으로의 기술적 과제는 다음과 같다.

- 신소재 및 하부 구조 설계 : 대부분의 FOWT은 강철 또는 콘크리트를 사용하고 있다. 탄소/유리 섬유 복합재(Glass fiber composite)와 같은 우수한 내구성을 가진 새로운 소재에 대한 연구가 요구된다. 다양한 재료와 구조 방식을 채택한 FOWT의 성능과 수명 주기 그리고 비용에 대한 분석이 필요하다.
- 다중 터빈 부유 시스템 : 앞에서 논의한 바와 같이 앞으로는 다수의 터빈을 하나의 부유체에 수용하는 풍력 단지가 증가할 것으로 예상됨에 따라 시스템의 안정성이 더욱 중요한 설계인자로 간주될 것이다. 이러한 시스템에서 주요 과제 중 하나는 파도, 바람, 플랫폼과 터빈 사이뿐만 아니라 한 개의 플랫폼에 수용되는 다중 풍력 터빈 간의 복잡한 상호작용을 고려하여야 한다. 상류 풍력 터빈이 발생시키는 후류는 하류 터빈 주위의 유동에 영향을 미쳐 결과적으로 하중과 발전량이 변하게 된다. 따라서 후류의 간섭을 최소화하여 발전량을 극대화시키도록 터빈을 배치하는 새로운 플랫폼 설계에 대한 검토가 요구된다.



그림 15. 요코스카 앞바다에 건설한 부유식 해상공항

또한 부유체의 제원이 커져 부유체의 강성이 상대적으로 약해지므로 구조물에 대한 유탄성해석이 필요해진다. 그러나 이 문제는 2001년 일본 요코스카 앞바다에 길이 1.0km에 이르는 바아지형 부유식 해상공항을 건설하여 경비행기로 이착륙을 시도한 ‘Mega-Float’으로 불리는 프로젝트에서 유탄성해석, 파력발전기를 설치하여 부유체의 운동 감소, 생태계에 미치는 영향 등 광범위한 연구가 장기간 수행되어 이를 참조할 수 있을 것이다[Suzuki 2005].

- 지리적으로 분산된 실시간 하이브리드 시뮬레이션(RTHS) : 지리적으로 다른 장소에 위치한 여러 RTHS시스템을 사용하여 분산 RTHS를 통해 FOWT의 응답 평가를 수행할 수 있다. 분산된 RTHS에서는 예를 들어 한 지역의 조파 수조 시설에서 플랫폼 실험이 다른 지역의 풍동에서 풍력 터빈 실험과 결합될 수 있다. 두 시설 사이의 통신과 데이터 전송은 인터넷을 통해 이루어진다. 분산된 RTHS의 주요 장점은 정밀한 물리실험시스템을 동시에 연결하여 근사화를 최소화하는 것이다.
- 인공 지능의 적용 : 디지털 전환기를 맞아 우리의 일상 등 사회 전반에 대변혁이 일어나고 있다. 이에 따라 공학 연구도 데이터 과학과 인공지능 기술을 활용함에 따라 물리 기반 모델링에서 데이터 기반 모델링 방식으로 변화할 것으로 예상된다. FOWT 시스템의 본질적인 복잡성으로 인해 하중과 시스템 거동에 대한 완벽한 수학적 모델을 갖기 어렵다. 앞으로 축적되는 데이터는 계산적으로 효율적인 메타 모델의 개발에도 활용될 수 있을 것이다.

VI. 결론

현 인류세의 절대 절명의 과제인 기후변화를 해결하기 위하여 2050년까지 탄소의 순배출을 0로 만들려면 대체에너지가 대폭 확대되어야 한다. 이런 관점에서 탄소배출 없이 대량으로 에너지를 생산할 수 있는 부유식 풍력 발전은 이를 뒷받침하는 강력한 수단이라 할 수 있다. 특히 부유식 풍력에서 발전한 전력을 이용하여 그린 수소를 생산하는 방식은 완벽한 대체에너지 생산시스템이므로 앞으로 각광받을 것으로 전망된다. 또한 앞으로는 단일 부유식 풍력 발전이 아닌 몇 개의 플랫폼이 연계되는 풍력발전단지로 발전할 가능성도 높아 보인다.

다만 해상 풍력에 소요되는 높은 비용이 문제로 남는다. 예를 들어 2010년 해상풍력의 건설에서 폐기까지 고려한 발전 단가(LCOE)는 평균 \$0.188/kwh 으로 상대적으로 높은 편이었으나, 2021년에는 그의 60%인 \$0.075/kwh로 대폭 낮아져 고무적이였다. 그러나 미국과 중국간의 패권경쟁으로 인한 공급망 제한, 러시아의 우크라이나 침공 이후 전 세계적으로 원자재 가격의 폭등, 물가상승과 높은 금리, 인건비 상승 등이 발생하여 풍력 발전용 터빈의 제작비가 \$145/kw로 급등하여 건설이 중단되는 사태를 빚기도 하였다. 특히 앞으로 투입 해역이 깊어지고, 부유체의 크기가 커지면 새로운 설비투자가 요구되면서 제작비가 더욱 상승하여 가격 경쟁력이 약화될 가능성을 배제하기 어렵다.

본 연구에서는 지금까지 설치된 해상 풍력 발전기와 발전단지의 현황을 살피면서 이들을 터빈과 부유체의 종류에 따라 분류하였다. 그 다음에는 해상풍력발전의 구성요소인 부유체, 계류계, 터빈과 로터-발전장치 그리고 이에 대한 제어시스템을 고찰하였다. 해상 풍력에 작용하는 환경하중은 유체역학적 방법과 공기역학적 방법으로 나누어 기술하였다. 이러한 하중을 받는 해상 풍력 발전기의 응답을 비연성해석, 수치해석 그리고 실시간 하이브리드 시뮬레이션으로 파악하는 방식을 소개하며, 각 방법의 장점과 단점을 짚어 보았다. 이어서 특이현상의 예로 스파 플랫폼에서 수직운동과 종동요의 고유주파수가 배수관계로 되면 나타나는 Mathieu 형의 불안정 운동을 예시하였다. 또한 날개의 피치를 제어하는 주파수가 타워의 고유진동수보다 높을 때 나타나는 스파플랫폼의 불안정성을 규명하기 위하여 Hywind 스파플랫폼에 대하여 피치 제어주파수를 변경하며 응답을 계산하였다. 그리고 해상 풍력에 대한 앞으로의 전망을 진단하였다. 이 연구에서 얻은

결론은 아래와 같다.

부유식 플랫폼은 대용량의 대체에너지 생산이란 장점에도 불구하고 많은 문제점을 지니고 있다. 무엇보다 먼저 지목해야 할 사안은 바람과 파도 등 해상 상태에서 6자유도 운동을 하여 시스템 작동에 방해요인이 되며, 시간에 따라 큰 표류운동이 나타나 위치안정성을 해칠 수 있다는 점이다. 6자유도 운동을 최소화하기 위하여 선박과 같은 바아지 형태보다는 스파 플랫폼이나 반잠수식 플랫폼이 대안으로 제안되고 있으나, Mathieu 형의 불안정 운동이나 피치 제어기에 따른 응답의 변화 등을 감안할 때는 스파보다는 반잠수식이 선호될 가능성이 높아 보인다.

부유체의 표류를 방지하기 위하여 보통 체인으로 구성되는 계류시스템이 채용되는데, 해상 풍력이 투입되는 수심 100미터의 해역에서는 계류시스템의 수평 지지력을 확보하기 위하여 체인의 길이가 매우 길어야 한다. 특히 복수의 부유체로 구성되는 해상 풍력 단지를 건설할 때 체인이 길어져 계류시스템 간의 간섭이 일어날 수 있어 이에 대한 세심한 고려가 요구된다.

한편 해상풍력발전기를 해석하는 많은 방법들이 제안되어 코드가 개발되었지만 관련되는 해상조건, 유체하중과 공기하중 그리고 유탄성해석 등 모든 인자와 이들 간의 연성효과를 포함하는 완전 연성 거동을 규명하는 해석법은 완성되지 않았다. 컴퓨터의 발전으로 앞으로도 CFD를 이용한 접근이 지속적으로 일어날 것으로 전망된다. 다만 계산량이 너무 방대하여 초기 설계에 적합한 효율적인 해석법의 개발에도 노력이 경주될 것으로 보인다. 실험적 관점에서는 관련되는 공기역학, 유체역학 그리고 유탄성역학에 대한 상사법칙을 동시에 만족시킬 수 없으므로 완전 연성 거동을 규명하는 실험법은 처음부터 불가능하다. 다만 이러한 어려움을 극복하며 사실에 가까운 현상을 밝히는 실시간 하이브리드 시뮬레이션(RTHS)은 더욱 발전할 것으로 전망된다.

끝으로 제주에서 서울을 오가며 자료를 수집 정리하고, OrcaFlex 프로그램을 이용하여 많은 계산을 수행한 김동은박사과정생에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 손영준 2012. 탄성과 굽힘을 고려한 계류계의 동적 거동 해석. 서울대학교 석사논문.
- 유정열 2023. 기후변화대책으로의 에너지 믹스. 대한민국학술원 2023년도 제2회 집담회 발제문.
- 최항순 1980. 해양파의 특성과 그 기술에 관한 고찰. 대한조선학회지 Vol.17 No.2, 43-47.
- 최항순 1981. 해양구조물에 작용하는 파랑하중에 대한 고찰. 대한조선학회지 Vol.18 No.2, 49-55.
- 최항순 2023. 기후변화대책으로의 에너지 믹스. 대한민국학술원통신 361호, p.23-29.
- ABS 2020. Guide for building and classing floating offshore wind turbines.
- Bae, Y. H. and Kim, M. H. 2013. Rotor-floater-tether coupled dynamics including second-order sum-frequency wave loads for a mono-column-TLP-type FOWT, *Ocean Engineering* 61, 109-122.
- Bae, Y. H. and Kim, M. H. 2014a. Coupled dynamic analysis of multiple wind turbines on a large single floater. *Ocean Engineering* 92, 175-187.
- Bae, Y. H. and Kim, M. H. 2014b. Aero-elastic-control-floater-mooring coupled dynamic analysis of floating offshore wind turbine in maximum operation and survival conditions. *Journal of offshore mechanics and Arctic engineering* 136(2).
- Bruinsma, N., Paulsen, B., Jacobsen, N. 2018. Validation and application of a fully nonlinear numerical wave tank for simulating floating offshore wind turbines, *Ocean Eng* 147, 647-658.
- Brunton, S.L. and Noack, B.R. 2015. Closed-loop turbulence control: Progress and challenges, *Appl. Mech. Rev.* 67(5).
- Chamorro, L.P. and Port-Agel, F. 2009. A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes: boundary-layer turbulence effects, *Bound-Lay Meteorol.* 132(1), 129-149.
- Cheng, P., Huang, Y., Wan, D. 2019. A numerical model for fully coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine, *Ocean Eng* 173, 183-196.
- Collu, M., Borg, M. 2016. Design of floating offshore wind turbines. *Offshore Wind Farms*, Elsevier, 359-385.

- DNVGL-RU-OU-0512 2020. Floating offshore wind turbine installations.
- Fontanella, A., Bayati, I., Taruffi, F., La Mura, F., Facchinetti, A., Belloli, M. 2019. A 6-DOFs hardware-in-the-loop system for wind tunnel tests of floating offshore wind turbines, 38th Intern. conference OMAE.
- Hall, M., Buckham, B., Crawford, C. 2014. Evaluating the importance of mooring line model fidelity in floating offshore wind turbine simulations. *Wind Energy* 17(12), 1835-1853.
- Hall, M., Goupee, A., Jonkman, J. 2018. Development of performance specifications for hybrid modeling of floating wind turbines in wave basin tests. *J Ocean Eng Mar Energy* 4(1), 1-23.
- Hywind Pilot Park, Aberdeenshire 2021. <https://www.power-technology.com/projects/hywind-pirot-park-aberdeenshire/>. Accessed: 2021-07-29.
- IECTS-61400-3-2 2019. Wind energy generation systems - Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines.
- James, R. and Ros, M.C. 2015. Floating offshore wind: market and technology review, Carbon Trust.
- Kincardine Offshore Wind Farm 2022. <https://www.principlepower.com/projects/kincardine-offshore-wind-farm/>. Accessed: 2022-03-28.
- Kono, T., Nebucho, S., Kogaki, T., Kiwata, T., Kimura, S., Komatsu, N. 2017. Numerical analysis of the effects of rotating wind turbine blades on the aerodynamic forces acting on tower, *Energies* 10(1).
- Kumar, D. and Chatterjee, K. 2016. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 55, 957-970.
- Larsen, T.J. and Hanson, T.D. 2007. A method to avoid negative damped low frequent tower vibrations for a floating, pitch controlled wind turbine, *J. of Physics, Conference Series* 75, 1-11.
- Larsen, J.W., Nielsen, S.R.K., Krenk, S. 2007. Dynamic stall modelling for wind turbine airfoils. *J.Fluids & Structures* 23(7), 959-982.
- Lee, H. and Lee, D.-J. 2020. Low Reynolds number effects on aerodynamic loads of a small scale wind turbine, *Renew Energy* 154, 1283-1293.
- Lee, J. and Zhao, F. 2022. Global wind report 2022, Tech. Rep., Global Wind Energy Council.

- Lemmer, F., Raach, S., Schlipf, D., Cheng, P.W. 2015. Prospects of linear model predictive control on a 10 MW floating wind turbine. Intern. conference on offshore mechanics and arctic engineering, Vol. 56574.
- Lienard, C., Boisard, R., Daudin, C. 2020. Aerodynamic behavior of a floating offshore wind turbine, AIAA J 58(9), 3835-3847.
- Liu, Y., Xiao, Q., Incecik, A., Peyrard, C., Wan, D. 2017. Establishing a fully coupled CFD analysis tool for floating offshore wind turbines, Renew Energy 112, 280-301.
- Masciola, M., Jonkman, J., Robertson, A. 2013. Implementation of a multisegmented, quasi-static cable model. 23rd Intern. OMAE.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W., Schaaf, A.S. 1950. The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans., American Institute of Mining & metal Eng. Vol.4, 11-22.
- Pinto, M.L., Franzini, G.R., Simos, A.N. 2020. A CFD analysis of NREL's 5MW wind turbine in full and model scales, J Ocean Eng Mar Energy 6(2), 211-220.
- Oh, K.-Y., Nam, W., Ryu, M.S., Kim J.-Y., Epureanu, B.I. 2018. A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives, Renew Sustain Energy Rev 88, 16-36.
- Offshore staff 2023. Floating offshore wind planning gaining momentum, Offshore, Oct.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., Blocken, B. 2019. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines, Energy 1, 838-857.
- Roh, J.B., Choi, H.S., Shin, H.S. 2005. A study on Mathieu-type instability of conventional spar platform in regular waves, Intern. J. Offshore & Polar Eng. 15(2), 104-108.
- Simos, A.N., Ruggeri, F., Watai, R.A., Souto-Iglesias, A., Lopez-Pavon, C. 2018. Slow-drift of a floating wind turbine: An assessment of frequency-domain methods based on model tests, Renew Energy 116, 133-154.
- Subbulakshmi, A., Verma, M., Keerthana, M., Sasmal, S., Harikrishna, P., Kapuria, S. 2022. Recent advances in experimental and numerical

- methods for dynamic analysis of floating offshore wind turbines-An integrated review, *Renew Sustain Energy Rev* 164, 1-33.
- Suzuki, H. 2005. Overview of Megafloat: Concept, design criteria, analysis, and design, *Marine Structures* 18(2), 111-132.
- Tran, T., Ryu, G., Kim, Y., Kim, D. 2012. CFD-based design load analysis of 5MW offshore wind turbine. AIP conference proc., Vol. 1493, American Institute of Physics, 533-545.
- Verma, M. and Sivaselvan, M. 2019. Impedance matching control design for the benchmark problem in real-time hybrid simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 134.
- WindFloat Atlantic fully up and running. 2021.
<https://www.offshorewind.biz/2020/07/27/windfloat-atlantic-fully-up-and-running/>, Accessed: 2023-07-29.
- Zhang, Y. and Kim, B. 2018. A fully coupled computational fluid dynamics method for analysis of semi-submersible floating offshore wind turbines under wind-wave excitation conditions based on OC5 data, *Appl Sci* 8(11).