

반 잠수 부유식 기초지지 풍력터빈 개발

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 신효순
(0637shin@reseat.re.kr)

1. 머리말

- 해상풍력에너지의 사용은 많은 관점에서 이롭다. 풍부한 풍력자원, 긴 서비스 시간 및 좋은 신뢰성이 해상풍력에너지를 적극적으로 개발하는 요인이다. 육상풍력에너지와 비교하면 해상풍력에너지는 공급의 안전성, 출력전기의 안정성 및 적은 환경영향과 같은 장점을 갖는다.
- 해상풍력에너지 산업의 발전과 함께, 해안으로부터 상당한 거리에 있는 이용할 수 있는 풍부한 풍력자원을 활용하기 위하여 해상풍력단지에는 얕은 수심에서 깊은 수심으로 이동하고 있다. 수심이 증가하면서 해상풍력단지의 건설비가 증가하고 심해지역에 풍력터빈 배치를 지연시키는 요인이 된다. 심해에서 해상풍력터빈의 비용 증가를 극복하기 위해 부유식 기초가 필요하게 되었다.
- 심해에서 해상풍력터빈을 지지하기 위한 부유식 기초를 이용할 때에 심해(수심 50~300m 범위)에서 고정형 하부 형태와 비교해서 저가격, 건설 및 설치절차에 관한 좋은 유연성, 쉬운 제거와 해체, 플랫폼 설계면에서 사용할 수 있는 기술적 해법의 다양성 및 동부 아시아(중국, 일본 및 한국), 미국(북서, 북동 해안 및 알래스카) 지중해(프랑스, 스페인, 이탈리아) 및 노르웨이를 포함한 많은 국가에서 실현가능 등 많은 중요한 장점이 된다.

2. 부유식 풍력터빈의 개발과 반 잠수식 기초의 응용

- 조사 중인 부유식 기초는 정적 안정성을 달성하기 위해 채택된 부유원리에 근거하여 반 잠수형, 스파(Spar)형 및 인장다리플랫폼(Tension Leg Platform)형의 3가지 형태로 구성할 수 있다.

- Spar 기초에서는 대형 원통 부표가 Spar 형태 구조물을 안정시키기 위해 사용된다. 부유 원통이 미리 조정된 축에서 기울어질 때 부표의 무거운 하위부분, 즉 밸러스트와 가벼운 윗부분이 모멘트 회복으로 이어지는 부력의 중심을 낮추기 위해 결합된다.
- 반면, TLP는 계류시스템에 의해 안정된다. TLP는 일련의 인장다리를 통해 해저에 계류된다. 다리는 기초가 완전히 기능을 발휘하기 전에 미리 긴장되어서 미리 조정된 위치와 기초의 자세는 다리들 사이의 긴장의 조정에 의해 회복된다.
- Spar와 TLP의 설계를 결합한 반 잠수식 기초가 정적 안정을 달성하기 위해 소개되었다. 반 잠수 부유식 기초의 개념이 소개된 후에 반 잠수식 기초 위에 풍력터빈을 설치하는 기술적 타당성이 Fukushima-FORWARD 프로젝트 Phase 1과 Windfloat 프로젝트의 두 프로토타입 프로젝트에 의해 증명되었다.

3. 인기 있는 반 잠수식 기초 설계

- 세 다리 반 잠수 부유식 기초
 - Drijfwind 프로젝트: 수직운동 반응과 전체 건설 부피를 감소할 목적으로 Dutch Tri-floater라고 부르는 3개의 다리를 가진 기초가 제안되었다. 용접 강구조인 Tri-floater는 필요한 부력을 제공하기 위하여 3개의 기둥을 사용하였다. 지름이 8m인 각 기둥은 두 층의 셸로 구성되어 있다. 각 기둥은 수밀 갑판에 의해 두 개의 구획으로 나누어져 있고 아래 구획은 물 밸러스트 탱크로 사용된다.
 - WindFloat 프로젝트
 - 세 개의 다리 부유식 기초의 다른 예로 WindFloat가 2011년 포르투갈 해상에서 시험되었다. Dutch Tri-floater와 비슷한 형태의 WindFloat는 수평 수 유인 판이 기초에 추가적인 유체역학적 관성을 제공하기 위하여 각 기둥의 아래 부분에 추가되었다. 강판이 큰 부피의 해수를 배수하므로 구조물의 수평적 역학반응이 개선된다.
 - 영구 해수 밸러스트 시스템이 각 기둥의 밑에 설치되어 있어서 이

것이 목표 draft에 도달하기 위해 기초를 낮춘다. 풍력터빈에 작용하는 평균 풍력하중에 의해 유도되는 강제반응을 감소하기 위하여 해수를 기둥에서 기둥으로 이동하기 위한 영구밸러스트 바로 위에 활성 해수밸러스트 시스템이 있다.

○ 고리 모양 부유식 기초

- 2013년 말에 주문 설계된 부유식 직각 플랫폼이 프랑스 풍력단지 개발자에 의해 개발되었다. 플랫폼이 작업과 보수를 위하여 풍력터빈의 바닥에 충분한 공간을 제공한다. 이 프로젝트에 의해 소개된 혁신은 기초를 건설하기 위해 콘크리트를 사용한 것이다.
- 기초설계는 구조물이 계류선을 따라 이동할 수 있다. 최신 개정판은 앵커위치를 재조정하여 터빈을 2자유도로 3각형 면적 내에서 이동할 수 있어서 풍력단지 레이아웃이 바람과 파랑의 방향과 같은 환경매개변수에 따라 실시간으로 최적화될 수 있다.



○ 콤팩트한 V형 부유식 기초

- Fukushima 프로젝트의 1차 단계는 2MW 풍력터빈이 콤팩트한 잠수식 기초의 중앙기둥에 탑재되었다. 버팀대가 구조물의 완전성을 증가하기 위해 적용되었고 기초의 계류시스템은 해저에 부착된 8개의 현수식 계류선을 가졌다.
- 2차 단계에서는 7MW 유압 구동형 부유식 풍력터빈 2대가 2014년에 설치되었다. 터빈의 1대는 spar 플랫폼에 의해 지지되었고 다른 1대는 반 잠수형 기초 위에 설치되었다.

4. 실험적 연구

- 부유식 기초의 역학에 관한 실험은 풍동이 내장된 파랑수조에서 수행된다. 반 잠수식 기초 주위의 풍력-파랑장의 모사가 관심사일 때는 고려되어야 할 두 상황(작동 상태와 생존 상태)이 있다. 작동 상태에서는 모사된 풍류의 평균속도는 특정 풍력터빈의 시작속도에서 차단속도까

지 변한다. 반면 수조에서 발생한 파랑은 해면에서 관측된 파랑을 모사한다. 생존 상태의 모사에서 평균풍속은 차단속도이고 발생한 파랑은 50년이나 100년 재현기간을 갖는 해면조건을 모사한다.

- 부유식 풍력터빈에 관한 파랑 수조시험은 로터 모델이 터빈 로터의 동적 거동을 모사하기 위하여 주로 사용되고 그것이 궁극적으로 부유식 기초 위에 있는 터빈 탑의 영향을 보여준다.
- NREL 5MW 수평축 부유식 풍력터빈이라고 부르는 전형적 다 축척 터빈이 2009년 NREL에 의해 개발되었다. 발명 이래 이 모델은 풍력/파랑 수조시험을 위하여 데이터를 수집하기 위한 인기 있는 터빈모델이 되었다. 블레이드의 회전은 터빈에 내장된 모터에 의하여 조정된다.
- 전력발전을 안정하게 유지하기 위하여 발전기 토크제어기와 전 기간 로터 집단 블레이드 피치제어기가 각각 정격작동점 아래에서 전력포획을 극대화하고 정격작동점 위에서 발전 속도를 조절하도록 설계되었다.
- 해상풍력터빈을 지지하는 반 잠수식 기초에서 현수식 계류선들이 가장 널리 적용된다. 반 잠수식 기초에 의해 채택된 현수식 계류시스템은 현수식 형태로 일련의 늘어진 곡선으로 구성되어 있고 이것이 밀려들기, 기우뚱, 좌우 동요, 구름, 상하 및 부침과 같은 6자유도 움직임을 위한 복원력을 기초에 제공한다.

5. 수치 연구

- 현재 수치모사의 두 가지 주 범주인 주파수영역해석과 시간영역해석이 수치적 접근법을 통해 반 잠수식 기초를 조사하기 위해 널리 적용된다. 시간영역해석이 시간전진계획을 통해 운동의 뉴턴식을 해결하여 어떤 상태에서도 기초운동을 예측하기 위해 사용된다.
- 공기 역학
 - 부유식 풍력터빈에 작용하는 풍력하중을 모사하기 위한 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)에 근거한 자유소용돌이후

류기법(FVW: Free Vortex Wake)이 개발되었다. 불안정 조건에서 동적 정지모델로 구성된 FVW 모델과 3차원 회전효과모델이 공기역학 하중모사의 현실적 수준을 개선하기 위하여 설계되었다.

- 풍력터빈의 수치 모사된 동적반응을 실험적 데이터와 비교를 통해 수치 모사에 의해 생산된 터빈의 퍼덕이는 모멘트와 공기역학적 반응이 실험적 데이터와 잘 맞았다.
- 공기 역학적 힘-변형 관계법: 계류시스템을 스프링으로 간주하는 간단한 힘-변형 관계모델에서 반 잠수식 기초의 6자유도 운동에서 유래된 기초의 변형이 기초를 다시 제자리에 놓는 회복력을 계산하기 위해 사용되었다.
- 유체 역학
 - 유체역학적 하중의 계산은 기초의 구조물에 의존한다. 부유식 기초에 작용하는 유체역학적 하중을 계산하기 위해 1차 유체역학적 이론을 적용하여야 한다. 1차 유체역학적 이론은 명시적으로 반사와 회절 효과를 모델링하는 것을 주목해야 한다.
 - 2차 유체 역학 이론도 해면에 가볍게 계류된 부유식 기초의 모사를 위해 제안되었다. 일련의 계류선들에 의해 해저에 계류된 반 잠수식 기초는 전형적인 가볍게 계류된 부유물이므로 2차 유체 역학적 이론이 유체 역학적 반응을 수치적으로 모사하기 위한 좋은 선택일 수 있다.

6. 맺음말

- 본문은 해상풍력터빈을 위한 반 잠수식 기초에 대한 설계, 실험조사 및 수치모사에 관한 최근에 이루어진 개발과 발전을 설명하고 있다. 해상 풍력터빈을 지지하는 기초의 분류 검토로 시작한다. 반 잠수식 기초의 설계에 대하여 기초의 종류에 따라 검토되었다. 다리가 셋, 고리 모양 및 V자형 반 잠수식 기초가 검토되었고, 반 잠수식 기초의 다른 설계들을 예시하는 프로젝트들이 검토되었다. 각 반 잠수식 기초 설계와 관련된 장점과 단점이 논의되었다.

- 반 잠수식 기초설계를 개선하기 위하여 풍력-파랑이 합쳐진 하중의 여 기 아래 기초의 동적반응을 조사하는 것이 필요하다. 실제 바다에서 실제 크기 시험을 수행하기 위한 비용과 복잡성 때문에, 파랑수조시험과 수치모사가 연구자를 위한 부유식 풍력터빈의 동적반응을 연구하기 위한 두 가지 접근법이다.
- 부유식 풍력터빈에 대한 파랑 수조시험에 관한 문헌조사를 통해 두 팬 매트릭스 설정 가운데 예인선 수조형상이 반 잠수식 기초에 관한 실험에 사용되는 것을 추천하였다. 또한 풍동모사기술이 요구되는 현실적 풍력 장 을 발생시키기 위하여 적용될 수 있다. 로터 모델에 관해서는 세 가지 단 순화가 검토되었다. 또한 현수선 계류선이 빈잠수식 기초에 널리 적용되 므로 그들이 수조 시험에서 일련의 스프링과 함께 모사될 수 있다.
- 수치제어 모사에 대해서는 공기역학, 계류선역학 및 유체역학이 다른 모델에 의하여 모사된다. 공기역학 모사를 위해서는 FVW모델이 전통 적 블레이드 모멘트 이론보다 더 나은 결과를 냈다. 3계류선 모델, 힘- 변위 관련법, 준정적 현수선법 및 동적 케이블법이 본문에서 논의되었 다. 유체역학 모사로는 Morison 식, 1차 유체역학이론 및 2차 유체역학 이론이 다른 응용을 드러냈다. 허브에 작용하는 풍력 연합력을 계산하 기 위하여 FLEX5와 3차원 유동 해결사인 EllipSys3D를 결합한 새로운 도구가 강조되었다.

출처 : Yichao Liu, Sunwei Li, Qian Yi, Daoyi Chen, “Developments in semi-submersible floating foundations supporting wind turbines: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 2016, pp.433~449

◁ 전문가 제언 ▷

- 가장 실현 가능한 플랫폼지지 부유식 해상풍력터빈의 하나인 반 잠수식 기초는 심해(수심 50~300m 범위)로 이동하는 해상풍력터빈을 빠른 속도로 발전시키고 있다. 본문은 반 잠수식 기초에 대한 종합적인 검토를 제시한다.
- 본문은 개념설계와 현재 운영 중인 프로젝트를 포함하는 반 잠수식 기초의 설계를 검토한다. 또한 반 잠수식 기초의 역학을 조사하기 위하여 과거 연구에 적용된 다수의 모사도구가 요약되었다. 풍력-파랑 하중의 여기를 받는 반 잠수식 기초의 동적반응에 관한 풍력-파랑 수조시험과 수치 모사가 포함되었다.
- 수조시험에 대해서는 현실적인 풍력-파랑장을 모사하고 부유식 풍력터빈의 여러 부분을 정확하게 모델링하기 위한 핵심기술을 검토하였다. 수치연구에 대해서는 풍력터빈 블레이드에 풍력하중을 예측하는데 일반적으로 사용되는 전통적 블레이드 요소 모멘텀 이론의 결점을 극복하기 위하여 소개된 자유소용돌이 후류모델이 설명되었다. 3차원 유동 해결사인 FLEX5를 갖는 EllipSys3D가 논의되었다.
- 시간 영역 분석 결과는 부유식 풍력발전시스템이 유의 파고가 4m 이하이면 안전하게 작동될 수 있고, 유의 파고가 5m 이상이면 동적 부침운동과 케이블 인장의 제한 때문에 풍력 터빈은 정지시켜야 하는 것을 보여 주었다.
- 현재 정부 계획으로는 부안 해상에 2GW 해상풍력단지 계획을 추진 중에 있다. 동해안 먼 바다와 제주도 남방 심해에 좋은 풍력자원이 있으므로 부유식 풍력단지가 파랑 수조와 수치모사에 의한 부유식 풍력단지에 대한 타당성조사를 통해 장기적으로 개발되어야 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.