

일본의 해상풍력터빈 부유체의 개발

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이홍원
(hongwlee@reseat.re.kr)

1. 머리말

- 해상풍력터빈(offshore wind turbine)의 부유체(floaters)는 일반 해양구조물에서와 같이 반잠수식(semi-submersible), TLP(Tension Leg Platform)방식, SPAR방식으로 분류된다. 넓은 의미에서 TLP와 SPAR도 반잠수식이지만 일반적인 반잠수식은 수면관통부가 다수 지주로 구성된 부유체를 현수선 계류(catenary mooring)하는 방식이다. 이에 비해 TLP는 강제부력을 이용하여 부유체를 해저에 계류(tension mooring)하는 방식이고, SPAR는 수면관통부가 단일 지주로 되어 있어 파도에 대한 영향이 적다.
- 여기서 TLP는 계류하는 해저 지반의 기초 공사가 필요하므로 타 방식에 비해 비용이 높고, SPAR 방식은 구조가 단순해 비용은 낮지만 구조상 흘수(draft)가 깊어 건조와 조립장소에 제약이 따른다. 일본 Mitsubishi 중공업은 'Fukushima 부흥·부유체식 해양풍력단지 실증연구사업'에서 7MW 풍력터빈 탑재 부유체에 V자형 반잠수식을 적용했다. 다음과 같이 V자형 반잠수식 부유체에 대해 설계와 공사방법의 타당성을 평가하고 향후 부유식 해상풍력터빈의 사업화에 관해 검토한다.

2. 설계와 공법의 타당성 평가

- 부유체는 길이 106m, 폭 14m, 깊이 7m의 직육면체(low hull)를 L자형으로 구성하고 각 끝단에 길이와 폭이 각각 14m이고 높이가 25m인 직육면체(column)를 배치한다. 이러한 설계는 건조 비용 절감과 공사의 시공능력 향상 그리고 운반·계류 성능 확보를 목표로 결정했다.
- 부유체 구조

- 구조 단순화 목적으로 대부분의 반잠수식 구조물에서 사용하는 경사진 재료를 사용하지 않고 직선 박스구조를 적용했다. 이에 따라 곡선 등 난이도가 높은 작업이 감소되어 건조비가 절감되고 정밀도가 향상됐다.
- 부유체 하부에서 부력이 생성되므로 진수(launching)·예항(towing)·착저(bottoming)·설치(installation)의 각 단계에서 부유체의 자기 안정성이 향상됐다. 이에 따라 시공 자유도가 향상되고 안전관리 관련 부수작업을 제거할 수 있었다.
- 부유체 하부에 큰 부력이 유지되므로 내부를 밸러스트 탱크(ballast tank)로 이용하여 각 작업 단계에 따라 적절하게 흘수 조절이 가능했다. 풍력터빈이 탑재되기 전 단계에서 흘수를 약 3.5m로 조정함으로써 항 내 입출항과 착저작업 등을 용이하게 실시할 수 있었다.
- 위와 같아 직선 박스구조와 얇은 흘수가 얇은 장점을 이용, 부유체를 해안 벽에 근접시켜 착저했다. 이에 따라 부유체의 동요가 방지되고 터빈 탑재 시 크레인의 작업반경이 줄어 작업효율과 품질이 향상됐다.

○ 공사방법

- 예항공사: 부유체는 예항 시 배수량이 10,000톤 정도이고 길보기 폭과 길이가 대략 150m, 85m로 큰 V자 형태를 보였다. 이와 같이 넓은 폭의 구조물을 예인하기 위해 사전 수조실험과 수치해석을 실시하여 최적의 예항 방향과 예항 저항을 검토했다. 결과적으로 태풍으로 인한 조치 이외에는 문제없이 안정된 예항이 가능했다.
- 착저공사: Onahama항 Fujiwara 부두해안의 수심과 조석간만의 차를 고려하여 착저 후 하부몸체(low hull) 윗면을 해수면 아래로 침수시켜 상부로 파도가 지나가도록 착저 마운드(mound)의 높이를 조정했다. 이 결과, 파랑변동압력이 적어져 필요 착저 정밀도 ±1m 대비 최대 평면편차 0.26m로 착저공사가 정밀하게 이뤄졌다.
 - 착저 마운드의 연약지반 공사(pre-load)가 적용되지 않아 풍력터빈 탑재로 인한 중량변화의 영향을 확인하기 위해 착저작업 후 마운드 침하량을 측정했다. 침하량이 아주 작은 결과로 문제가 없는 것

으로 확인됐다.

- 착저 시 마찰저항의 증가를 막고 접지면 도장을 보호할 목적으로 마운드와 부유체 사이에 8cm 두께의 아스팔트 공사를 실시했다.

○ 계류 설치공사

- 계류공사에는 계류용 로프에 장력을 가하는 것이 필요한데 종래의 초기장력 관리방법에서는 해상 크레인을 부유체로 접근시켜 체인을 당기며 설치하는 작업이 필수적이다. Fukushima 해역과 같이 조류와 바람에 부유체가 크게 요동하는 해상에서 크레인을 사용한 장력 관리는 어려운 작업이며 안전문제도 뒤따른다.
- 선급협회와의 협의를 통해 초기장력 관리방법 대신 체인링크수(체인 길이) 관리방법을 적용했다. 또한 시공방법에서는 해상 크레인에 의한 작업 대신 부유체에 설치한 체인리프터(winch)로 체인을 감아올리는 방법을 적용했다. 계류작업의 계획 시 최종 앵커 위치에서의 초기 계류 장력을 변수로 설정 검토함으로써 안전한 작업이 이뤄질 수 있었다.

○ 부유체의 성능

- 계류시스템에 있어서, 계류 페어리더(fair-leader) 근방의 계류 로프에 설치한 경사계로 측정된 절대 경사값으로부터 환산한 계류강도와 해양의 기상 데이터를 기준한 계산값이 서로 잘 일치했다. 이것으로 계류시스템의 설계 타당성을 확인했다.
- 부유체 롤링(rolling)과 피칭(pitching)에 대한 계측 결과와 해석 결과를 비교했다. 롤링에서는 측정값이 해석한 값보다 약간 높았고 피칭에서는 반대 경향을 보였다. 두 요동이 대체로 잘 부합됨에 따라 부유체 설계방법의 타당성을 확인할 수 있었다.
- 구조설계하중에 있어서, 부유체의 하부 몸체와 기둥의 대표 부위에 부착한 변형게이지 측정값을 응력으로 환산하고 레인프로(rainflow) 해석을 통해 장기빈도 분포도를 작성했다. 장기 확률에 해당되는 외삽(extrapolation) 결과와 하부 몸체의 종 방향의 휨 응력 해석 결과가 거의

동일함에 따라 구조설계 하중의 타당성이 확인됐다. 또한 설계 결과에서 파랑의 방위별 발생빈도가 응력에 끼치는 영향도 파악할 수 있었다.

3. 경제성 평가

- 부유식 해상풍력터빈의 경제성 평가는 풍력터빈 설비비용뿐만 아니라 운전관리·보수점검·매진 수입을 포함한 전체 비용에 대한 평가가 필요하다. 하지만 여기서는 풍력터빈의 설비비용 중 부유체와 계류시스템에 대해서만 경제성을 평가했다.
 - 건조비용: V자형 반잠수식 부유체는 일반적으로 반잠수식 구조물에서 사용되는 경사 부재를 사용하지 않고 직선 상자 구조물을 사용했다. 이에 따라 부재가공의 단순화와 용접 등 작업의 효율화로 가공단가가 절감됐다. 양산 시 건조 장소에 대한 자유도 증가도 기대된다.
 - 예항 및 터빈 탑재공사 비용: 풍력터빈의 탑재와 계류준비공사는 평온한 항내로 부유체를 견인하고 착저한 후 실시했다. 착저 마운드 조성 등 부대공사는 필요하지만 흘수가 제한적인 항내에서의 준설작업 등 인프라 정비에 드는 비용을 줄일 수 있었다.
 - 계류작업 비용: 본 부유체의 계류라인은 계류 시의 제약과 운동성능면에서 8분으로 정했지만 다른 터빈에 비해 많다. 하지만 계류시스템 개선과 계류작업 방법에 따라 비용을 크게 줄일 수 있어 경우에 따라서는 계류 본수가 전체 비용에 끼치는 영향은 적다. 향후 양산시에는 공사 전체 측면에서 효과적인 방법을 종합적으로 판단할 필요가 있다.

4. 사업화에 대한 검토

- 부유체 설계: 실증실험을 통해 비용절감이 가능한 설계 아이디어를 얻었다. 예를 들면 반잠수 상태에서 부유체를 예항하고 지탱하기 위해 각 지주의 예항 포인트의 확보, 부유체의 돌기 부위의 최소화를 위한 외부 전원방식 장치의 적용, 부유체의 접근성과 안전성 향상을 위한 교통장치의 개선 등이 있다. 이 중에는 일부 비용이 상승될 수도 있으므로 사

업화 검토 시에는 종합적인 경제성 평가가 필요하다.

- 부유체 크기: 부유체의 소형화로 재료비, 예항·계류 작업비용은 절감되지만 터빈의 운동가속도 허용량, 계류력 등을 충분히 검토할 필요가 있다. 이 실증실험을 통해 얻은 다양한 설계 아이디어로 부유체의 소형화가 한층 진전될 수 있을 것이다.

○ 계류방식

- 계류방식은 시공성과 밀접하게 관련되어 시공방법과의 병행 검토가 필수적이다. 실증실험의 성과로 대형앵커와 앵커체인에 의한 시공법은 확립됐지만 사업화 시 추가 비용절감이 필요하다. 실증실험으로부터 비용절감이 가능한 계류방식 개선 아이디어가 도출됐고 자체 연구에서 중간 추를 사용한 계류방식의 비용절감도 확인됐다.
- 부유체 철거와 대형부품 교환 작업의 고려: 부유체 본체는 항내에서 대형 부품 교환 작업이 가능하도록 흘수와 형상이 고려되는데, 육상풍력터빈에서는 크레인 없는 블레이드 교환 공법이 보수업자에 의해 개발되는 등 기술이 진전되고 있어 해상에서도 대형 터빈부품의 교환작업 기술이 개선될 것이다. 철거/대형부품 교환방법에 따라 계류방식이 정해지므로 계류 해제를 전제로 한 계류시스템이 효과적이다. 이때 특수 장치도 적용 가능하므로 이를 포함한 전체 비용 평가가 필요하다.
- 이상과 같이 계류방식과 시공성에는 밀접한 관계가 있어 양쪽을 동시에 검토하는 것이 필수적이다. 즉 부유체 공급자, 계류공사업자와 함께 작업선박운항자 등 관련 전문가 팀을 구성하여 전체작업에 대한 최적화를 추진하는 것이 비용절감과 안전성 향상에서 매우 중요하다.

○ 전체시스템

- 건조 방법: 실증실험에서는 Nagasaki에서 부유체를 건조 Onahama까지 예항하여 풍력터빈을 탑재했지만 설치장소 근처에서 부유체를 건조하면 비용절감과 공기단축이 가능하다. 부유체 건조만을 생각하면 조선소에서의 작업이 합리적이지만 설치공사, 운전, 보수·관리

등 전체 비용과 시공기간을 고려하면 사업화할 때는 설치장소 인근 장소에서의 건조방법도 검토할 필요가 있다.

- 대형 풍력터빈의 적용: 착상식 풍력단지과 마찬가지로 부유식 풍력단지도 기당 용량을 늘려 설치대수를 줄이는 것이 기초공사의 비용절감에 유리하다. 본 부유체는 7MW용이지만 단순계산 시 현재 시장에 구입 가능한 최대 용량의 풍력터빈(8MW)의 탑재도 가능할 것으로 보인다. 또한 계류시스템과 시공비용 등 설치 터빈개수에 따른 비용이 높으므로 대형터빈을 적용하는 것이 효과적이다.
- 설치 기재의 정비: 부유식 해상풍력터빈은 다양한 작업의 효율과 안전성을 위해 적합한 공사 기재가 필요하다. 구미에 이어 일본도 착상식 풍력터빈의 사업화가 진전되므로 향후에는 착상식 풍력터빈 공사용 잭업(Jack-up)선이 확보될 것이다. 또한 다른 해상산업용으로 최신 대형 AHTS(Anchor Handling Tug Supply)선의 건조도 예상되므로 이러한 기재를 부유식 해상풍력터빈에 활용하면 가동효율 향상으로 용선가격 절감과 효율화로 공사비용 추가 절감이 가능할 것이다.

5. 맺음말

- 이상의 실증실험을 통해 Mitsubishi 중공업이 설계, 건조한 부유체의 성능, 작업성 및 경제성은 타당성이 있는 것이 확인됐다. 또한 이를 통해 얻은 지식과 별도 자체 연구 성과로부터 향후 양산과 사업화 시에서는 개선된 설계방안, 계류방식과 시공방법을 적용함으로써 종합적인 비용절감이 가능할 것으로 예상된다.

출처 : Masao Komatsu, Hitoshi Kumamoto, Makoto Ohta, Hiroshi Tanaka, Hideo Mori, Satoshi Miyazaki “日本の海域に調和する洋上風車浮體の開発-V字型セミサブ浮體の設計及び工法の妥当性評価-”, 「三菱重工技報(日本)」, 53(2), 2016, pp.28~36

◁ 전문가 제언 ▷

- 다양한 신재생에너지 중 경제성과 기술 성숙도에서 우수하게 평가되는 풍력발전은 전 세계적으로 연 20~30%의 성장을 거듭하고 있다. 이러한 성장에 힘 입어 2014년에는 누적 설치 용량이 369GW에 달해 원자력의 설비 용량을 상회한 것으로 알려지고 있다. 그동안 육상에서 주로 건설되던 풍력발전단지는 입지 선정의 용이, 양질의 풍력자원 확보 등에서 유리한 해상풍력(offshore wind power)으로 확대되고 있다.
- 해상풍력터빈이 설치되는 부유식 구조물인 부유체(floaters)는 일반 해양구조물에서와 같이 반잠수식(semi-submersible), TLP(Tension Leg Platform) 방식, SPAR 방식으로 분류된다. 이들 방식 중 TLP 방식은 계류(mooring)용 해저지반의 기초공사가 필요하여 건설비용이 높고, SPAR 방식은 구조가 단순하여 건설비용은 낮지만 구조상 흘수(draft)가 깊어 건조와 조립장소에 제약이 따른다.
- 일본의 Mitsubishi 중공업은 'Fukushima 해역의 부유체식 해양풍력단지 실증 연구사업'에 있어 7MW 풍력터빈을 탑재하기 위한 부유체에 V자형 반잠수식을 적용했다. 또한 실증연구사업 수행 결과를 토대로 V자형 반잠수식 부유체에 대한 설계와 공사방법의 타당성을 평가하고 향후 부유식 해상풍력터빈의 사업화에 대해 검토했다.
- 유럽국 중 독일의 경우는 2020년까지 총 전력공급 중 신재생에너지원의 비율을 20%로 계획하는 등 각국은 온실가스 배출감축을 위해 풍력 등 신재생에너지의 공급비율의 확대에 주력하고 있다. 국내에서도 서남해안의 2.5GW 해상풍력발전단지 등 해상풍력발전단지 건설이 추진되고 있다. 하지만 최근 진행되는 조선해양산업 구조조정을 겪으면서 인력·기술·장비 활용이 가능한 해상풍력 관련 사업 확대가 어렵다. 국가의 해상풍력발전계획의 확대와 함께 관련 기업의 해상풍력 관련기술의 개발 및 국제 경쟁력 확보가 필요하다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.