

# 부유식 해상풍력터빈의 하중설계와 안정성 평가

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

## 1. 머리말

- 일본은 2011년부터 동일본대지진 이후 Fukushima 부흥을 캐치프레이즈로 하여 '부유식 해상풍력단지 실증연구사업('Fukushima floating offshore wind farm demonstrate project)'을 착수했다. 이 사업은 서로 다른 3대의 부유식 풍력터빈을 Fukushima 해역 20km 근해에 건설하고 생산 전력은 해저케이블로 동북지방으로 송전하는 것이다.
- Mitsubishi중공업은 이 사업에서 세계 최대 규모 부유식 해상풍력터빈을 건조하였다. 부유체(floaters) 상부에 탑재되는 7MW 풍력터빈은 기존의 고정식 해상풍력터빈을 사용하고, 2가지의 기술과제를 가지고 있다. 즉 부유체 요동을 고려한 하중설계, 그리고 부유식 풍력터빈의 고유문제인 풍력터빈 제어시스템과 부유체 요동이 결합되어 나타나는 불안정성 문제다.
- 부유식 해상풍력터빈은 파랑(ocean wave)에 의해 동요되므로 부유체 부분과 풍력터빈 부분을 연결하는 지지구조부에 작용하는 하중은 고정식에 비해 증가한다. 이 불안정 요동은 부유식 풍력터빈의 건전성과 지지구조에 작용하는 피로하중에 나쁜 영향을 끼치므로 매우 중요하다.

## 2. 부유체 요동의 영향을 고려한 하중설계

- 풍력터빈과 부유체의 결합하중(coupled load)을 해석하는 데에는 우선 하중설계 툴(tool)을 사용하여 부유식 풍력터빈 수치모델을 구축하는 것이 필요하다. 풍력터빈의 하중설계 방법은 다물체 동역학(multi body dynamic) 해석을 기초로 풍력터빈을 탄성 보(elastic beam) 집합체로 가정하고 로터(rotor)의 공기역학과 제어를 고려하여 각부 변위와 하중을 시계열로 해석하는 수치 시뮬레이션을 수행한다.

- 육상터빈과 고정식 해상터빈은 기기의 인증 취득이 필요하며 인증기관에 의해 승인된 설계 틀을 적용한다. 하지만 신규 설비인 부유식 풍력터빈은 적용 가능한 인증된 틀이 없다. 따라서 복수의 하중해석 틀을 적용, 각각의 계산값이 같은 경향인 것을 확인하며 수조실험에 의한 검증을 병행하는 방식으로 하중설계를 진행했다.
  - 해석 대상인 7MW 부유식 풍력터빈의 주요 제원은 다음과 같다. 구동 트레인은 유압식이고, 로터 직경 167m, 허브 높이 105m, 그리고 정격풍속은 12m/s이다. 부유체는 V자형 반잠수식(semi-submersible type)으로서 26,000t의 배수량을 가지고 있다.
- 하중계산 모델의 타당성 검증을 위해 터빈 부분은 이미 적용하고 있는 육상풍력터빈의 실증실험 데이터와 비교 검증을 실시해 타당성을 확인했다. 아직 검증 실적이 없는 부유체 부분에 대해서는 수조실험을 실시하여 확보한 데이터로 검증을 실시했다.
- 파랑 조건에서 부유체 운동을 계측하기 위해 대형 내항성능(seakeeping performance) 수조를 활용하고 1/64 크기로 부유체 모형을 제작했다. 파고(wave height)가 정현파 형태로 일정하게 변하는 규칙파(regular wave)에 대해 부유체의 응답 진폭을 기록하고, 해석 결과와 실험 결과를 비교했다. 응답이 커지는 파도 주기와 부유체의 동조주기(natural period)가 잘 일치하는 것을 확인하였다.
  - 이러한 규칙파는 실제 해상에서는 일어나지 않는 가상조건으로 부유체의 기본 특성인 동조주기 등을 파악할 목적으로 이용했다. 응답 값에 대한 정확도는 실제 해상에서 발생할 수 있는 불규칙 파를 사용하여 다음과 같이 평가했다.
  - 복수의 서로 다른 파고와 주기가 중첩된 불규칙 파에 대해 부유체가 피치(pitch) 방향으로 응답하는 시계열 파형으로부터 추출한 통계량으로 해석과 실험을 비교했다. 불규칙 파 조건으로 통상운전 시와 재현 기간 50년의 극한파랑(extreme wave) 발생(운전정지) 시를 가정했다.
  - 각각의 파도 방향에 대해서도 해석 결과와 실험 결과와 잘 일치됨에

따라 불규칙 파에 대한 부유체의 응답이 정확도가 높게 재현된다는 것을 알 수 있었다. 이상의 검증으로부터 하중설계에 적용한 수치모델의 정확도를 확인했다.

- 하중설계 조건에 있어서, 설계하중 계산은 부유식 터빈이 설치되는 Fukushima 해역의 기상/해상 조건과 터빈 상태(통상운전, 정지, 고장)를 조합하여 설계하중 조건을 설정했다. 부유체는 V자형으로 비측대칭이기 때문에 파도 방향에 따라 응답이 다르므로 다양한 풍향과 파도 방향을 조합하여 수천 케이스를 시뮬레이션 했다.
  - 태풍이나 폭풍 시의 극한파고는 타워의 기초부 설계하중을 지배하는 중요한 하중 조건이다. 장기에 걸친 해상 파도 실측 데이터베이스(국토교통성의 NOWPHAS 데이터)를 이용하여 극한 통계해석을 실시하고 파도의 방위특성을 고려한 설계파고 모델을 산출하여 이를 하중설계에 적용했다.
  - 이 설계파고 모델에 의해 육상으로부터의 파도(W파)가 근해로부터의 파도(E파)에 비해 0.6배 정도 감소됨에 따라 실제 상태를 고려할 때 타당한 해석 결과로 판단되었다.
- 하중계산 결과는 재현기간 50년 극한파고의 경우, 부유식 풍력터빈의 타워 기초부에 작용하는 최대 모멘트는 고정식에 비해 약 3배에 달했다.
  - 이것은 풍력터빈을 지지하는 타워 기초부에 기존의 풍력하중 외에 블레이드(blade)와 나셀(nacelle) 등 상부 중량과 이들의 관성력에 의해 발생하는 부유체 요동으로 모멘트가 작용하기 때문이다.
  - 하중계산 결과를 반영하여 부유식 풍력터빈의 타워 부분에 대해서는 고정식 풍력터빈보다 구조를 강화시켜 내하중성이 향상된 설계를 적용했다.

### 3. 부유식 풍력터빈의 결합진동(coupled vibration) 안정성

- 부유식 풍력터빈에는 터빈제어와 부유체 요동의 결합으로 불안정 요동

의 부정적 영향 감쇠(negative damping)가 발생할 우려가 있다. 이 자여진동(self-excitation vibration)이 발생되면 풍력터빈이 크게 기울어 사고로 연결되므로 충분한 설계 검토가 필요하다. 모형을 이용한 풍동 실험으로 부유체의 안정성을 평가했다.

- 풍력터빈 출력은 풍속 증가의 3승에 비례하여 증가하며, 정격출력에 이르면 블레이드 각도 제어를 통해 풍속 변화에도 일정한 출력을 유지한다. 이것을 '전부하 운전 상태'라고 부르며, 이 때 풍력터빈의 로터 면에 대해 하류방향으로 작용하는 추력(thrust)은 풍속 증가에 따라 감소되는 특성을 지닌다.
  - 전부하 운전 상태에서 풍력터빈이 뒤로 기울어지면 나셀이 바람 하류방향으로 이동하여 로터에 유입되는 바람의 상대속도가 감소되므로 블레이드 각도가 제어된다. 이에 따라 추력이 증가하게 되고 증가된 추력으로 나셀은 더욱 하류 측으로 밀리며 부유체가 더욱 뒤로 기울게 된다. 이 현상이 반복되어 풍력터빈의 하류 방향 경사가 진행되어 부유체는 불안정 상태가 된다. 나셀이 상류 방향으로 기울진 경우에도 같은 원리로 부유식 풍력터빈은 불안정하게 된다.
- 부유식 풍력터빈에 대한 안정성 실험은 대형의 경계층 풍동을 활용하며, 풍력터빈 모형을 수면에 띄우기 위해 바람통로에 소형 수조를 설치했다. 1/64 크기의 풍력터빈 모형에는 실제와 동일하게 풍속에 따른 블레이드 각도 조정용 서보기구와 제어장치를 구성하고, 실제 터빈과 동등한 발전성능과 추력하중을 갖는 블레이드 모형을 구성했다.
- 부유체의 안정성은 부유체에 작용하는 유체에 의한 정 감쇠력과 추력에 의한 부 감쇠력과의 균형에 영향을 받는다. 즉 유체 감쇠력이 충분히 큰 부유체는 안정하고 부의 감쇠가 발생하지 않는다.
  - 확인을 위해 감쇠력이 거의 제로가 되는 풍력터빈 모형인 로킹 모델(rocking model)을 별도 제작하여, 부유식 풍력터빈 모형과 비교했다. 이 로킹 모델은 전후방향으로 회전 가능하도록 타워 기초부 밑에 베어링과 스프링으로 지지되어 풍력터빈의 전후 동요상태를 재현할 수 있다. 또한 고유주기와 복원력이 부유체 모형과 일치되게 조정한다.

- 실험에 있어서 풍동의 풍속을 풍력터빈의 정격출력운전 시 풍속범위 안으로 설정하여 발전 상태를 시뮬레이션하고, 이때의 부유식 풍력터빈의 전후방향 회전각(pitch 각) 등을 측정했다.
- 풍력터빈의 로킹 모델 실험에서는 시간이 경과됨에 따라 부유체의 전후방의 응답(부유체 pitch)이 커지며 부의 감쇠 발생으로 불안정 동요가 성장하는 것을 확인할 수 있었다.
- 이에 비해 실제 부유식 풍력터빈을 사용한 실험에서는 부유체 응답은 거의 일정하고, 유체의 감쇠력이 충분히 크기 때문에 부의 감쇠가 발생하지 않아 안정성이 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 맺음말

- ‘부유식 해상풍력단지 실증연구사업’의 7KW 부유식 해상풍력터빈에 있어서 파랑에 의해 발생하는 요동에 대한 풍력터빈의 안정성과 터빈제어 부유체 결합진동에 대한 안정성을 검증했다.
- 향후 계획된 Fukushima 해역의 실증실험에서는 부유식 풍력터빈의 운동성능, 하중특성, 제어안정성 등에 관한 실제기기 검증을 실시하여 부유식 해상풍력발전의 경제성 및 안정성 향상을 추구할 것이다.

출처 : 中村 昭裕, 林 義之, 松下 崇俊, 刈込 界, 本田 明弘, 太田 真, “浮体式洋上風車の荷重設計及び動揺安定性の評價技術”, 「三菱重工技報(日本)」, 52(1), 2015, pp.30~36

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 근래에 들어 풍력발전은 신재생에너지의 주력 에너지원으로 급성장하고 있다. 육상풍력발전의 경우 사이트의 제약, 소음, 경관 문제 등으로 해상풍력발전이 점차 확대되고 있다. 또한 해상설치에서도 육지에서 근접한 연안의 고정식 해상풍력발전에서 수심 50m 이상의 해역에서 설치 가능한 부유식 해상풍력발전으로 진화하고 있다.
- 일본은 2011년 Fukushima 해역 20km 근해에 건설되는 부유식 해상풍력 단지 실증연구 사업을 착수했다. Mitsubishi중공업은 이 프로젝트 내의 세계최대급 7MW 부유식 해상풍력터빈을 건조하고 있다. 부유식 풍력터빈은 부유체(floaters) 요동을 고려한 하중설계와 풍력터빈 제어시스템과 부유체 요동이 결합되어 나타나는 불안정성에 대한 대응이 필요하다.
- 이 회사는 부유식 풍력터빈 수치모델을 구축하고 시뮬레이션을 통해 하중설계를 실시했다. 설계 후 1/64 크기의 풍력터빈 모형을 제작하고 수조, 풍동실험기술을 활용하여 설계결과를 검증했다. 하중계산 결과는 재현기간 50년 극한과고에서 풍력터빈의 타워 기초부에 작용하는 최대 모멘트는 고정식의 약 3배에 달했다.
- 세계 풍력에너지협회(GWEC)가 2012년에 발표한 세계풍력발전 누적용량은 282,482MW이며, 국가별로는 중국, 미국, 독일, 스페인, 인도, 영국 순이다. 한편 세계 해상풍력 누적용량은 5,426MW 수준이고 영국, 덴마크, 중국 순이다. 에너지소비 세계 10위의 에너지 다소비국인 한국은 풍력발전 누적용량이 608.5MW(2014년 기준)이며, 해상풍력은 2020년까지 서남해 2.5GW 해상풍력발전단지 건설 등이 계획되어 있다.
- 우리나라는 현재 풍력발전은 매우 저조하지만 조선강국의 이점을 살리면 세계 3대 해상풍력 강국으로의 도약이 가능하다. 이것은 신재생에너지 확대는 물론 국가 주력사업인 조선사업의 회복을 위해서도 필수적이다. 참여 산업체의 경제성 확보를 위한 제반 제도 개선이 필요하다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.