

# 해상 풍력터빈의 지지구조물에서 피로하중의 상대평가 방법

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 나덕주  
(djra15@reseat.re.kr)

## 1. 서언

- 해상풍력터빈(OWT, offshore wind turbine)의 시간영역 분석에서는 계산시간을 줄이는 것이 중요하다. 각 하중 조건에서 피로 예측을 위한 시뮬레이션은 최소 60분이 기준이고, OWT의 인증을 위해 많은 하중 조건이 필요하다. 이러한 이유로 완전 복합적인 공력-서보-수력-탄성 모델은 계산이 많이 필요하고 시간이 많이 든다.
- 특히 반복적인 계산에 새로운 시뮬레이션이 필요하므로 설계 최적화는 효율적이지 못하다. 따라서 분석효율을 높이는 것이 미래 OWT의 성공에 있어서 중요한 관심사라 할 수 있다. 계산시간을 줄이는 방법은 임의 하중조건에 대한 시뮬레이션 시간을 단축하는 것이다. 그 중 하나는 주파수영역 방법을 사용하는 것이다. 이 방법은 대단히 빠르지만 피로 예측의 경우 일반적 시간영역 방법보다 정밀도가 떨어진다.
- 60분 시간영역 분석방법보다 빠르면서 더 높은 정밀도수준을 유지할 수 있는 방법이 필요하다. 이 목적으로 짧은 시간에 피로한도를 개략적으로 예측할 수 있는 시뮬레이션 방법을 제안한다. 적은 데이터를 아주 단순하게 통계적으로 처리하는 방법과 선형 회귀모델을 사용하여 손상등가하중(DEL, damage equivalent loads)을 계산할 수 있다. 아래에 구체적 방법과 그 장점 및 제약조건에 대해 설명한다.

## 2. 시뮬레이션 및 예측 방법

- 이 연구에서는 OC4 프로젝트의 상향 풍 재킷과 5MW급 터빈으로 구성된 OWT 모델을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 재킷은 약간 경사진

4개의 지지다리와 4단의 X 보강재로 구성되어 있고, 타워와 재킷 사이 연결 부재는 콘크리트 블록이고, 재킷은 해저 면에 견고하게 고정되어 있는 구조이다.

- 난류 풍과 불규칙적인 풍랑 조건에서 Fedem Windpower 소프트웨어를 사용하여 시간영역 시뮬레이션을 수행하였다. 난류 풍은 IEC Kaimal 모델에 근거하여 Turbsim을 사용하여 계산하였고, 불규칙적인 풍랑은 Fedem을 적용한 Pierson-Mokowitz 풍랑 스펙트럼으로 계산하였다.
- K13 Deep Water Site에 의한 집중 산포도를 사용하여 각 풍속에 대해 중요한 파도 높이와 최대 파도 간격의 값을 결정하였고 수심은 50m로 정하고, 풍속 전단(wind shear)과 해양생명체(marine growth)는 일정하게 존재하는 것으로 간주하였다. OWT 모델과 이 환경 조건을 입력으로 하고 Fedem을 사용하여, 초기 가속구간을 지나 60분 동안에 걸쳐 대표적으로 0.025초 시간 간격으로 시뮬레이션 하였다.
- 피로한도를 평가하기 위하여 재킷의 큰 부재에 대해  $6.3 \times 10^8$  사이클에서의 DEL을 계산하였다. 이 분석에는 낙수계수(rainflow) 알고리즘을 사용하여 부재 축 하중의 시간이력 응답해석으로 부터 일정 하중 영역의 사이클 수를 계산하였다. Palmgren-Miner 규칙에 의한 선형 시뮬레이션을 사용하여 누적 손상을 계산하였고, 용접 강제 특성에 부합되도록 SN 선도에서 음의 반대 기울기를 사용하였다.
- 각 하중 조건에 최초 10분 시뮬레이션으로부터 60분간의 시뮬레이션 예측을 위해 4가지 수법(schemes)을 사용하였다. 첫 번째 수법은 단순히 5분 후 및 10분 후의 DEL(DEL5 및 DEL10이라 칭함)을 각각 계산하는 방법이다. 두 번째 수법은 최초 10분을 2분 씩 5개 구간으로 나누어 각 구간의 평균값과 10분 후의 DEL값(DEL10)을 사용하여 회귀 선도를 결정하였다.
- 세 번째 방법은 최초 10분을 2개의 5분 구간으로 나누고 각 구간의 평균값과 DEL10을 사용한다. 네 번째 방법은 5개의 DEL2, 2개의 DEL5 및 DEL10을 사용한다. 뒤 3가지 방법은 소 구간의 평균값을 사용하기 때문에 최초 10분을 적용해도 내재적인 편향을 최소화 할 수 있다.

- 이 방법의 적용성을 입증하기 위하여 4가지 풍속(8, 12, 18, 22m/s)과 그에 상응하는 유의 파고(1.31, 1.7, 2.47, 3.09) 및 최대 기간(5.67, 5.88, 6.71, 7.4)을 입력 변수로 사용하였다. 또한 추가적으로 재킷에 대해 2개의 모델을 고려하여 이 방법을 관련 설계의 평가에 적용할 수 있는지 검토하였다. 이 모델에서는 지지다리와 보강재의 두께는 일정하게 유지하고 외경을 OC4 모델보다 각각 10%, 20%만큼 크게 하였다.

### 3. 평가 결과

- 먼저 DEL에 대해 간단한 시간 종속 분석을 실시하여, 로그 선형 회귀 알고리즘에 필요한 전력법칙 거동이 명백한 것을 입증하였다. 재킷의 모든 위치와 모든 풍속에서 선형 회귀에 대한 결정계수가 최댓값 1에 근접하고, 로그 변환 후 유사하게 선형적으로 거동하는 것을 보였다. 서로 다른 위치 및 풍속에서 어떻게 기울기가 변하는가에 대한 패턴이 존재하는 것은 아니다.
- 해수면에 노출된 부재에 6개의 서로 다른 풍속의 확률적 표현에 적용된 첫 번째 예측 수단(PS1)은 정확한 예측을 의미하는 것이다. 난류 풍속에 의한 결과는 첫 번째 방법으로 60분에 걸쳐 계산한 DEL을 예측할 때 다양성이 더욱 커진다. 두 번째 수단(PS2)은 PS1보다 개선된다. 즉 예측 값이 DEL60의 참값에 근접할 뿐 아니라 DEL60의 참값의 산포가 아주 낮지 않으면 예측의 산포도 상당히 낮게 나타난다.
- 모든 부재와 풍속에 대해 DEL60의 참값으로부터 예측의 평균 변위를 계산한 결과는 예측 수단에 대해 총체적 정밀도에 상당한 의미를 나타낸다. 여러 수단에 대해 예상했던 오차를 나타냈으며 두 번째에서 네 번째 방법은 첫 번째 방법보다 더 정밀한 것으로 나타났다.
- 지지다리는 터빈의 주 하중을 받쳐주므로 터빈 하중의 변화에 더 민감하기 때문에 두 번째에서 네 번째 방법에서 지지다리보다 보강재의 경우 더 정확한 값을 나타낸다. 위쪽 구조재의 경우엔 하중변화의 영향이 훨씬 크지만 바닥에 위치한 지지다리의 경우엔 하중변화의 영향이 훨씬 적게 나타난다.

#### 4. 평가결과에 대한 분석

- 평가결과에 의하면 표준 시뮬레이션 시간을 사용하지 않고 단순한 절차로 아주 정확하게 재킷의 피로 손상을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 지지다리의 경우 다양성이 높아 접근 정밀도에 한계가 있다. 문제는 이 절차를 얼마나 유용하게 또 언제, 어떻게 적용하는가이다. 재킷의 완전한 분석을 하려면 모든 재킷 부재를 평가하여야 하므로 보강재를 충분한 정밀도로 평가하는 것은 대단히 어렵다.
- 본 분석방법은 높은 정밀도가 필요하지 않은 최적화의 한 부분으로서 아주 기본적인 분석에 적용할 수 있다. 최적화 관점에서 이 방법을 사용할 수 있는 가장 적합한 분야는 구조변경과 관련한 안정성에 관한 내용이다. 이 분석방법은 예측 정밀도에 심각한 효과는 없으며, 최초 모델의 상세 분석에서 획득한 정보를 사용하여 예측을 수정하는데 사용할 수 있음을 알 수 있다.
- 보강재의 경우 오차는 6~5% 또는 그 이하 수준이고, 지지다리의 경우 오차는 16% 수준이다. 이 오차 범위가 허용되는 주제에 대해 이 방법을 적용할 수 있다. 본 연구의 결과 PS2, PS3 및 PS4 예측방법의 정밀도는 서로 약간의 차이를 보이고 있다. PS2와 PS4는 아주 비슷하여 차이를 식별하기 어렵다.
- 본 연구에는 단지 축 하중 DEL만을 고려하였으므로 굽힘 모멘트가 평면상에서 또는 평면 밖에서 유사하게 작용하는가를 확인할 필요가 있다. 또 구조를 변경할 목적으로 이 방법이 안정성이 있는가를 시험할 수 있는 다른 수단을 검토하여야 한다. 정밀도에 큰 문제가 없다면 같은 방법으로 외경을 축소할 수 있다.
- 향후 비 균일한 절차로 변경하거나 예측이 똑 같이 안정적임을 확인할 필요가 있다. 체계적인 변경이 예측 수단의 정밀도에 영향을 미치지 않으므로 비 균일 변경에 대해 똑 같은 작동을 기대할 수 있다. 이는 체계적으로 변경할 경우에는 심각하게 변화하지만, 비 균일 변경의 경우 고유진동수가 크게 변하지 않기 때문이다.

## 5. 결론

- 본문에 OWT의 시간영역 피로 한도를 신속히 평가하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 최초 10분 동안 및 60분에 걸친 선형 회귀 및 외삽분석의 통계적 처리에 근거를 두고 있다.
- 그 결과는 저 풍속 영역에서 지지다리 부재에 대한 정확도에서 약간의 한계성이 있긴 하지만 신뢰할 수는 있었다. 이 방법을 조사에 적용하려면 종합적으로 추천하기 전에 견고성과 최적 지지다리 부재에 대해 세밀하게 탐색할 필요가 있다.

출처 : Lars Einar S. Stieng, Ruth Hetland, Sebastian Schafhirt, Michael Muskulus, “Relative assessment of fatigue loads for offshore wind turbine support structures”, *Energy Procedia*, 80, 2015, pp.229~236

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 해상풍력터빈의 지지구조물은 고정식과 부유식으로 나뉜다. 해저 지반에 설치되는 고정식은 수심과 지반특성에 따라 모노파일, 트라이포드, 재킷, 중력식 등 네 가지 형식이 있고, 부유식은 다양한 개념이 제안되어 실증단계에 있으며 스파형 부유식 풍력발전기가 대표적이다.
- 해상풍력터빈(OWT, offshore wind turbine)의 복합적인 공력-서보-수력-탄성 모델은 계산이 많이 필요하고 시간이 많이 든다. 각 하중 조건에서 피로 예측을 위한 시뮬레이션은 최소 60분이 기준이고, 인증을 위해 많은 하중 조건이 필요하다. 본문에 적은 데이터를 단순하게 통계적으로 처리하는 방법과 선형 회귀 모델을 사용하여 손상등가하중(DEL, damage equivalent loads)을 계산할 수 있는 방법을 제시한다.
- 구체적으로 OC4 프로젝트의 상향 풍 재킷과 5MW급 터빈으로 구성된 재킷 형 지지구조물을 가진 OWT 모델을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 재킷은 해저 면에 고정된 약간 경사진 4개의 지지다리와 4단의 X 보강재로 구성되어 있고, 타워와 재킷 사이 연결 부재는 콘크리트 블록 구조이다. 결과 이 방법은 저 풍속 영역에서 지지다리 부재에 대한 정확도에서 약간의 한계성이 있긴 하지만 신뢰할 수 있었다.
- 2015년 신 기후체제 파리협정 이후, 각국이 신재생에너지 발전사업 투자를 늘리고 있고 이에 따라 대형 해상풍력 프로젝트 추진 역시 힘을 얻고 있다. 유럽은 2020년까지 온실가스 배출을 1990년 대비 20% 줄이고, 1차 에너지의 20%를 신재생 에너지에서 획득하고, 에너지 수요의 20%를 절감하는 목표를 달성하기 위해 추진하고 있다.
- 국내 해상용 대형풍력터빈 제조사는 경영악화로 잠시 중단하였지만 다시 재개할 가능성에 대비하여야 한다. 해상 기초구조물의 최적화 설계를 위해 파력, 조류 력, 풍력, 지진 력 등 설계 주요 인자와 발전기의 회전력, 추력, 양력, 진동 등에 의한 동적하중과 상·하부 구조물간 하중 전달에 따른 복합적인 거동분석 등을 연구하고 풍력에너지에 대한 지속적인 기반 기술과 사회적 지원 등을 확보할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.