

해상 풍력터빈의 지지구조물에 대한 경사기반 방법을 사용한 최적화 설계

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

1. 서언

- 해상풍력 프로젝트에서 지지구조물은 총 투자비용의 약 17%를 차지한다. 따라서 그 비용을 줄이기 위해 학문적 및 산업적으로 수많은 연구를 수행하고 있다. 자동차 및 항공 산업에서 구조 최적화가 집중적으로 사용되고 있지만 해상 풍력터빈 지지구조물에 적용하는 것은 상대적으로 제한적이다.
- 이전 연구에서 제시했던 단주식(monopile), 재킷(jacket), 격자형 타워 및 스파(spar) 형 부유체 등 여러 형태의 해상풍력터빈 지지구조물은 서로 다른 시뮬레이션 최적화 방법을 사용하여 비용을 줄이고 있다. 최적화 문제는 제한 조건이 대단히 많고 비 볼록형 현상이므로 설계과정은 일반적으로 수차례의 반복 작업을 수반하게 된다. 비선형성과 시간경과 경향을 파악하기 위해 시간영역 시뮬레이션 방법으로 해상풍력시스템의 동적 해석을 수행하므로 계산시간이 많이 소요된다.
- 민감도 분석의 경우 복잡한 변화도를 계산하기 위해 보통 유한차분 방법을 사용한다. 이 방법은 적용하기는 쉬워도 계산에 의한 비효율성과 수치적 오류가 발생하기 쉽다. 결과적으로 이 방법은 해상풍력터빈 지지구조물, 특히 설계 변수가 많은 복잡한 구조물의 설계에 있어서 효율적이고 효과적인 최적화 방법론이라 할 수 있다.

2. 집적화 된 최적화 구조

- 해상풍력터빈 지지구조물의 설계는 비선형 동적 응답형의 구조 최적화 문제로서 이를 해결하기 위해서는 Matlab 의 집적된 동적 시뮬레이션

및 최적화 모듈을 사용한다. 목적함수는 지지구조물의 중량이고 동특성 분석에서는 유한요소 방법을 사용하여 전체 해상풍력터빈 시스템의 반응 문제를 해결한다.

- 로터에 작용하는 공기역학적 하중은 FEDEM의 R7.0.4를 사용하여 계산하고, 해수면 아래 잠기는 부분에 작용하는 수동력 하중은 Morison 공식을 사용한다. 그 후 지지구조물 반응에 의해 내부 하중이나 응력의 회복과 설계 제한조건을 계산한다. 설계 제한조건은 한계 상태함수에 근거를 두고 해상 및 풍력산업에 사용되는 설계 표준으로 규정된다.
- 크기 제한조건은 설계 변수의 상부 및 하부 한계와 변수 사이의 기하학적 관계를 규정한다. 고유진동수 제한조건은 1차 모드 고유진동수를 규정하고 바람 및 파동 여기 주파수 영역의 밖에 위치하도록 한다. 극한 하중 제한조건은 튜브형상 부재와 조인트에 대해 실시하는 극한 한계상태(ultimate limit state, ULS) 분석에 근거를 두고 구조강도 및 안정성이 만족되는가를 점검한다.
- 피로하중 제약조건은 튜브형상 조인트에 대해 실시하는 피로한계상태(fatigue limit state, FLS) 분석에 근거를 두고 설계하중 조건하에서 20년 설계수명의 최소 생존성을 확인한다. 설계 민감도 분석의 경우에는 해석적 직접미분방법(direct differentiation method, DDM)을 사용하여 목적함수의 경사도 벡터 및 제약조건 함수를 계산한다. 설계 제약조건에 대한 구체적 설명과 상응하는 민감도의 계산방법을 기술하고 있다.

3. OC4 해상풍력 재킷 하부구조물에 대한 사례 연구

- OC4 프로젝트에 사용된 해상풍력터빈 재킷 하부구조의 사례를 통해 최적화 구조를 평가하였다. OWT시스템은 NREL이 개발한 5MW 수평축 3-블레이드 터빈 그리고 단주식 타워, 콘크리트 연결부 및 재킷 하부구조를 포함하고 있는 지지구조 시스템으로 구성되어 있다. 전체 풍력터빈은 지면에 단단히 고정하는 것으로 가정하였다.
- 재킷 하부구조는 다리가 4개이고 X형 보강재와 양 바닥 보강재로 강화된 대칭 설계로 되어 있다. 설계 변수는 재킷 부재의 직경과 두께이고,

모두 22개의 설계변수를 가지고 있고, 초기 값은 OC4 재킷 치수에 근거를 두고 있다. OWT모델은 바람과 파랑 하중이 복합적으로 작용하는 상태로 시뮬레이션 하였고, 바람 및 파랑 조건은 3차원 난류 풍력장(turbulent wind fields)으로 모델링 하였다.

- 풍력변수는 허브 높이에서 평균 풍속, 난류 강도, 바람 경사 지수(wind gradient exponent)로 구성되고, 파랑 변수는 중요한 파도높이, 최대 스펙트럼 주기, 최대 형상변수를 포함하고 있다. FLS 하중은 정상 난류 풍 및 정상 해상상태 하에서 전력 생산조건을 시뮬레이션 하였고, ULS하중 조건의 터빈을 모델링 하였다.

4. 평가결과에 대한 분석

- 민감도는 최초 재킷 치수 즉 보강재 직경과 두께, 코드 직경과 두께로 평가한다. 수치 집적은 0.01초 및 0.025초 시간 간격으로 수행한다. 첫 번째 및 두 번째 수행 결과에 의하면 ULS 및 FLS하중 조건에 대해 변위를 예측하는데 있어서 중앙 차분방법이 DDM과 잘 일치하고 있으며 이는 2.5% 제공근 변위(NRMSD)보다 적었다. 한편 전방 차분방법은 6% 제공근 변위만큼 차이를 보였다.
- 전방 차분방법은 중앙 차분방법에 비해 똑 같은 단계의 민감도 분석에서 더 큰 단절 오차(truncation errors)를 나타냈다. 전체 OWT 시스템에 대해 절점 변위(nodal displacement)를 고려할 때 차이가 더 크게 나타나 12% 제공근 변위를 보였다. 재킷의 지지다리 치수가 변할 때 구조물의 수직 변위영역에서 차이가 더 크게 나타났다.
- 튜브형상 빔의 극한하중 제약조건의 민감도에 있어서 제공근 변위는 상응하는 ULS 변위보다 더 크다. 전방 차분접근 방법으로 0.025초 시간단계로 분석할 때 22.4% 제공근 변위를 나타냈다. 튜브형상 조인트의 극한하중 제약조건에 대해 DDM과 중앙차분방법 사이에서 집계된 제공근 변위는 2.5% 이하로 나타났다.

5. 결론

- 본문은 해상풍력터빈 지지구조물의 동적 제한조건 최적화문제를 해결하기 위한 해석적 경사기반 최적화 방법을 제시하였다. 또한 OC4 해상풍력터빈 재킷 모델을 사용하여 이 방법을 입증하였으며, 그 중요 관점에 대해 요약 설명하였다.
- 설계 민감도 분석의 경우 중앙 차분 접근법은 해석적 DDM과 잘 일치하였다. DDM은 물론 튜브 형태의 빔에 대한 극한하중 제약조건을 계산하는 동안 발생할 수 있는 수치적 오차를 피할 수 있다. 빔에 인장과 압축이 교차적으로 작용하여 내부 하중과 응력이 발생할 경우, 수치적 오차는 ULS 적용 인자들의 불연속성에 기인한다.
- DDM 방법은 유사한 정밀도 또는 보다 높은 수준의 정밀도로 최적화하는 동안 해결하여야 할 방정식의 수가 적기 때문에, 유한 차분 방법보다 상대적으로 더 효율적이다. 전체 최적화 구조는 설계 제한조건을 만족시키면서 개선된 설계 해법을 찾기 위한 성공적 및 효율적 탐구를 입증하고 있다.
- 피로 및 극한하중 제한조건은 최적화를 수행하는 동안 최적 설계 해법을 결정하는데 중요한 영향을 미치고 있다. FLS 제한조건은 최종 설계를 확정하는데 결정적 제한사항이다. 대부분의 변수들이 제약조건의 한계 이하인데 비해, 버클링 및 압축하중과 같은 ULS 제한조건은 최적화 과정에서 가장 활동적인 것으로 나타났다.

출처 : Kok-Hon Chew, Kang Tai, E.Y.K. Ng, Michael Muskulus, "Optimization of Offshore Wind Turbine Support Structures Using an Analytical Gradient-Based Method", *Energy Procedia*, 80, 2015, pp.100~107

◁ 전문가 제언 ▷

- 해상 풍력터빈 지지구조물은 제약조건이 많고, 비 블록형이고, 선형적이 아니므로 설계를 최적화하는 것은 대단히 방대한 작업이다. 본 논문은 위 문제를 효율적이고 효과적인 방법으로 해결할 수 있는 해석적인 경사기반 방법에 대해 설명한다. 목적과 제한함수의 설계 민감도를 해석적으로 평가하여 크기, 고유진동수, 극한하중 및 피로하중 관점에서 구조물의 최적화를 수행하였다.
- 해상풍력 프로젝트에서 지지구조물은 총 투자비용의 약 17%를 차지하고, 보통 단주식(monopile), 재킷(jacket), 격자형 타워 및 스파 형 부유체 등 4가지 형태의 지지구조물에 대해 서로 다른 시뮬레이션 최적화 방법을 사용하여 비용을 줄일 수 있다. 유한차분 방법은 해상풍력터빈 지지구조물, 특히 설계 변수가 많은 복잡한 구조물의 설계에 있어서 효율적이고 효과적인 최적 방법론이라 할 수 있다.
- 이 평가는 OC4 자켓 하부구조에 대해 단순화 하중조건 하에서 모든 설계 제약조건을 만족시키면서 구조 중량을 52% 가량 줄일 수 있는 최적 재킷을 설계할 수 있다. 또한 해석적 민감도 분석이 유한 차분 근사법보다 더 정확하고 효율적인 것으로 나타났고, 이 방법은 극한 하중 조건 분석에서 흔히 발생하는 수치적 인공물을 피할 수 있다.
- 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 경영 악화로 잠시 중단하였지만 다시 재개할 가능성에 대비하여야 한다. 해상풍력터빈 지지구조물의 동적 제한조건 최적화문제를 해결하고, 피로 및 극한하중 제한조건 최적화를 통한 최적 설계 해법을 결정하는 등 복합적인 거동분석에 관해 연구할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.