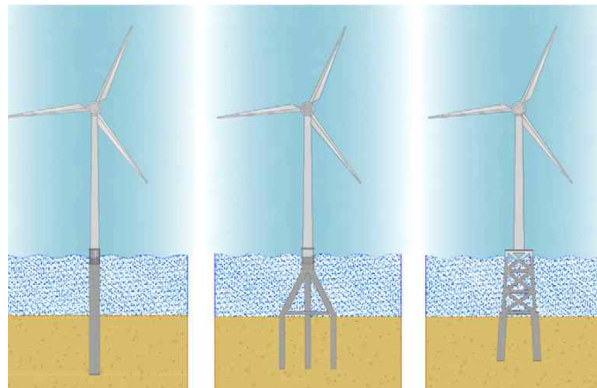


해상풍력 하부지지 구조물 기술

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

1. 개요

수심 70m이하의 해상풍력발전은 해저에 직접 기초를 둔 하부지지 구조를 사용한다. 모노파일은 25m까지, 삼각대는 25m~50m까지 및 재킷은 25m~70m까지의 수심에 설치된다. <그림 1-1>은 모노파일, 삼각대 및 재킷 지지구조물을 보여준다. 3가지 하부지지 구조물에 미치는 풍력하중, 파랑하중, 피로하중 및 지진하중을 분석하고 국내 해상풍력 단지에 적합한 하부지지 구조물을 검토한다.



<그림 1-1> 모노파일, 삼각대 및 재킷 지지구조물⁽⁹⁾

2. 해상풍력 하부지지 구조물의 종류와 특성

2-1. 모노파일

2-1-1. 기상·해상 조건을 평가하는 방법

해상풍력 단지(이하 WF) 하부 고정구조물을 설계하려면 기상·해상 조건의 평가가 필요하다. 현재 해상풍력 발전에 관한 설계 지침으로서 IEC 61400-31, GL2 등의 기준이 있으나 이들 기준은 유럽의 기상·해상 조건에 근거하고 있어 그대로 사용할 수 없다. 또 기상·해상 조건은 풍력단지 위치에 따라 변화하고 특히 해상조건은 수심이 변수가 된다. 그러나 해상에서는 지표면조도가 균일하다. 수심의 변화가 완만한 경우에는, 그룹화하여 기상·해상조건을 평가하는 것이 합리적이다. 우리나라의 자연환경

조건을 고려하여 WF를 대표하는 풍력위치를 선정 하는 방법이 중요하다.

2-1-2. 기상 조건의 평가

폭풍 파랑시의 평가에 이용하는 극한풍속(연 최대 풍속의 50년 재현 기대치)은 태풍과 비 태풍으로 인한 연 최대풍속의 비 초과 확률의 합성 확률분포에서 추정하고, 난류(turbulence) 강도는 기류 해석에서, 피로하중 평가에 이용되는 풍속의 빈도분포는 기상대 지침을 토대로 추정된다.

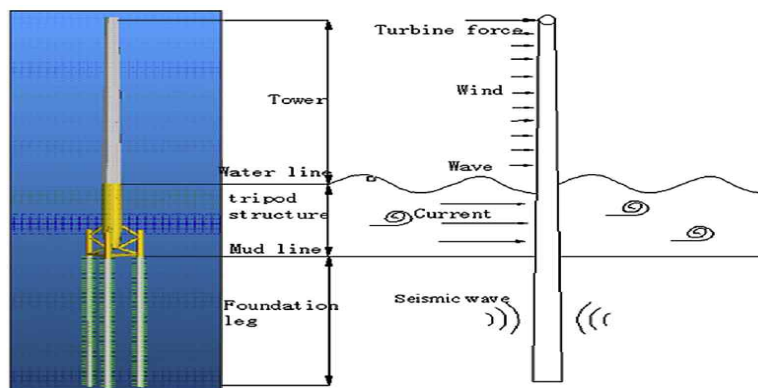
우리나라처럼 열대 저기압(태풍)및 온대 저기압(비 태풍) 양쪽이 강풍의 요인이 되는 혼합 기후대에서는 각각의 강풍의 요인을 고려할 필요가 있다. 태풍에 의한 연 최대 풍속의 비 초과 확률 산출에 있어서는 관측기 사이가 1만년의 태풍 시뮬레이션으로 산출한다. 참고로 태풍으로 인한 강풍의 불확실성 극한값 풍속은 50.2m/s으로 산출한다. 50년 재현 기대 풍에 포함되는 최대 풍향 조사는 IEC61400-3에 규정된 폭풍 파랑 실지수와 거의 같다.

정리하면, 자연환경 조건을 고려한 해상풍력 단지의 지지 구조물 설계에 필요한 기상·해상 조건을 평가한 결과, 기상 조건의 평가 시에는 태풍 및 비 태풍의 혼합 모델을 이용한 극한 풍속도의 확률 분포를 이용한 값이 관측값과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

2-2. 삼각대 파일의 동적 신뢰성 기반 최적화

2-2-1. 동적 분석

지지 구조물은 해상의 무작위 바람, 파랑 및 조류 활동의 영향을 받는다. 지지구조는 타워, 타워에 용접된 연결 요소, 삼각대의 중앙 기둥, 테이퍼 끝을 가진 기둥, 브레이싱 부재, 삼각대 다리 및 기초파일로 구성되어 있고 지지구조물의 높은 타워로 인해 구조물은 횡 방향 하중하의 대량 변형을 피하고 최소 자연 진동수를 달성하기 위해 충분한 굽힘 강성이 필요하다. <그림 2-1>은 삼각대 하부 지지구조물을 보여 준다.



< 그림 2-1> 해상풍력 터빈지지 구조물의 하중⁽³⁾

최적 목적은 삼각대의 구조가 <그림 2-1>의 황색 부분인 진흙 선 위와 해면 아래 위치하

는 것이다. <그림 2-1>에 보이는 것처럼 구조물에 작용하는 힘은 타워, 타워 톱에 있는 터빈력, 삼각대 하부 구조물 상의 파랑과 조류하중 및 기초 파일을 통한 지진 하중이다.

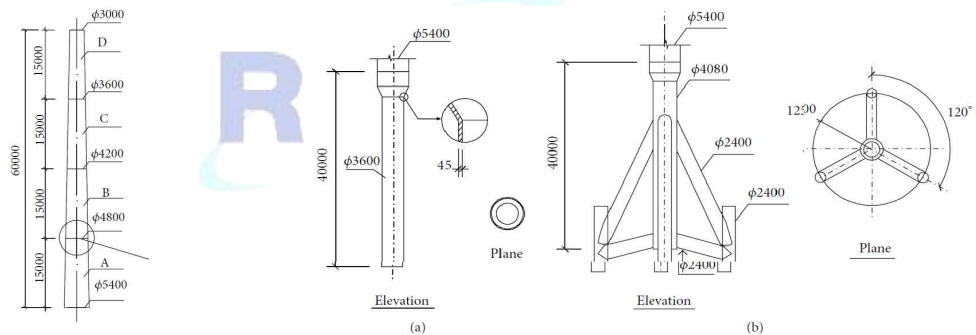
2-2-2. 통계적 동적 최적화

지진 발생을 고려한 복잡한 하중 아래서의 구조물의 동적 특성과 구조물 최적화를 발견하기 위하여 구조물의 동적 분석이 수행된다. 실험적 감소를 통해 변수의 수가 감소되어 최적화비용을 극적으로 낮출 수 있다.

2-3. 모노 파일과 삼각대의 구조적 성질 비교

2-3-1. 지지 구조물의 형태

모노파일과 삼각대 두 종류의 풍력터빈지지 구조물을 조사해보면 이들 구조물은상부 타워는 동일하나 하부 구조물은 상이하다. 지지구조물은 629MPa의 항복강도를 갖는 S620M 고장력강으로 만들었다. <그림 2-2>는 모노파일과 삼각대의 상부 타워의 형상인데 <그림 2-3(a)>는 모노파일, <그림 2-3(b)>는 삼각대의 하부 형상을 보여 준다.



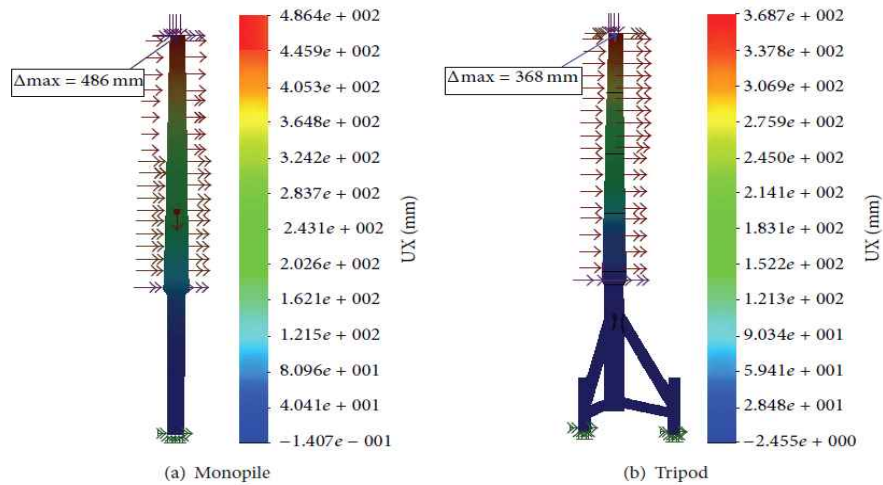
<그림 2-2> 모노파일과 삼각대의 상부타워 형상⁽⁴⁾

<그림 2-3(a)> 모노파일 하부형상⁽⁴⁾

<그림 2-3(b)> 삼각대 하부형상⁽⁴⁾

2-3-2. 수치 분석

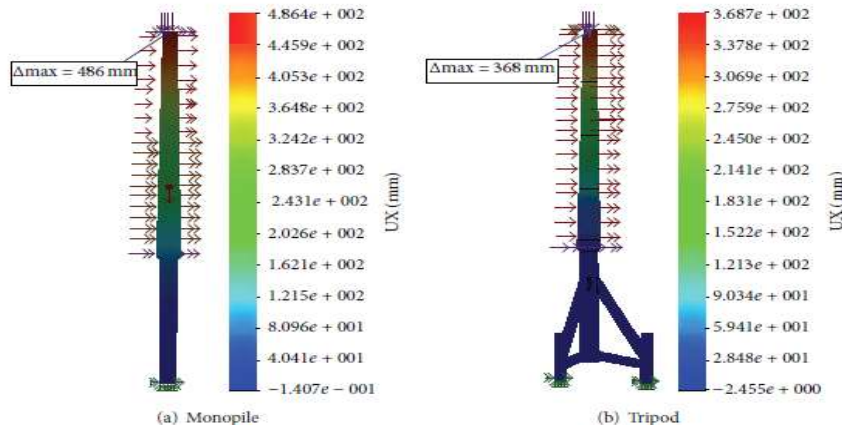
<그림 2-4>는 모노파일과 삼각대 지지구조물의 계산된 응력도를 보여 준다.



<그림 2-4> 모노파일과 삼각대의 길이 방향의 응력⁽⁴⁾

<그림 2-4(a)>와 <그림 2-4(b)>의 응력 그림을 비교하면 삼각대 구조물은 변화 경계에서 최대 응력값이 하부 지지구조물로부터 상부 타워까지 보이는 반면, 모노파일 구조는 최대 응력값이 하부 파일 끝에 있다. 또한, 모노파일 구조의 최대응력은 삼각대 구조물의 것보다 약 2.35배 더 크지만 아직 항복강도 620MPa보다 훨씬 작아서 이들 두 구조물은 탄성한계에 남아 있다.

<그림 2-5>는 모노파일과 삼각대 지지구조물의 변형도를 보여준다. 변형이 해저 상의 높이와 함께 증가하고 최대 변위는 옆 방향에서 구조물의 틈에서 발생한다. 모노파일 구조물은 486mm의 최대 변형을 보여주는 반면, 삼각대 구조물은 368mm의 최대 변형을 가졌다. 즉 삼각대 구조물이 모노파일 구조물보다 더 큰 강성을 가졌다. 사례 연구에서 모노파일 구조물의 최대응력과 변형이 삼각대 구조물의 것 보다 2.3과 1.3배 더 컸다. 삼각대 구조물이 모노파일 구조물 보다 더 강성이 크고 더 좋은 응력 제어 능력을 가진 것을 보여 주었다.



<그림 2-5> 모노파일과 삼각대의 측 방향 변형도⁽⁴⁾

3. 하부지지 구조물의 피로하중

3-1. 삼각대 지지 구조물

3-1-1. 시간영역 피로분석

모노파일과 삼각대 지지구조물이 20~30m의 얇은 수심에 사용되었다. 피로손상은 시간 이력에서 사이클로 알려진 응력이나 변형반전의 결과로 발생한다. 피로손상 계산에서는 관련된 응력 범위와 평균 응력이 가장 중요한 사항이다. 해상 구조물의 해수를 끼얹는 구역주위에 위치한 하부 구조물에 관한 S-N 곡선을 사용하는 것이 통례이다. 그러나 부식은 중요한 열화 메커니즘이고 부식 심각도와 제공된 코팅 보호에 따라 수명기간이 끝나기 전에 실패한다.

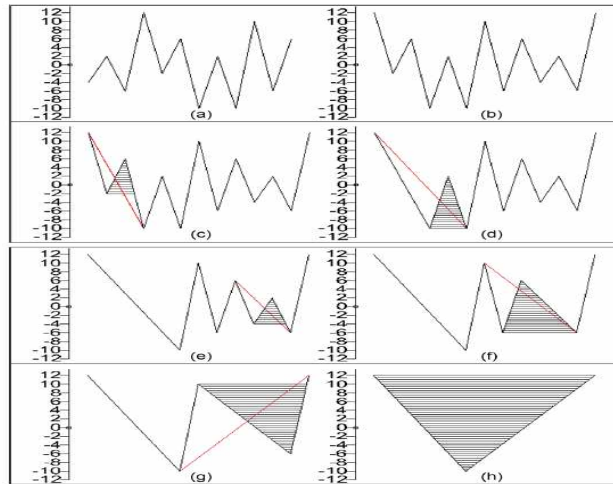
각 응력 사이클로부터 누적된 피로 손상은 선형 손상 누적의 가정에 근거한 관련 S-N 곡선으로부터 계산된다. 해상풍력 터빈에 작용하는 환경 및 작동 하중은 변동이 심한 응력 시간 이력을 만들고, 이 시간 이력이 장기 응력 분포로 표현될 수 있다. 3개의 가장 흔한 사이클 계산법에는 평면교차, 정점 사이클 및 비 흐름 사이클(rain flow cycle)이 있다. 비 흐름 사이클 방법이 가장 정확하다.

3점 비 흐름 사이클 계산방법은 한 사이클을 형성하기 위하여 3개의 연속적인 점들을 활용한다. 이 방법은 연속적인 범위인 $\Delta S_1=S_1-S_2$ 및 $\Delta S_2=S_2-S_3$ 를 규정하는 3개의 연속적인 응력 점들에 근거한다. 만약 $\Delta S_1 \leq \Delta S_2$ 이면 S1 으로부터 S2의 1 사이클이 추출되고 $\Delta S_1 > \Delta S_2$ 이면 사이클로 취급되지 않는다.

절차는 절대 값에서 최고 정점이나 최저 계곡의 어느 쪽이든 더 큰 곳에서 시작한다. 그 뒤에 사이클은 맨 처음부터 밀폐 이력곡선까지 모든 3개 연속 점을 체크하여 결정된다. 사이클을 형성하는 2점은 폐기되고 나머지 점들이 서로 연결된다. 집계는 모든 응력점이 활용될 때까지 계속된다.

<그림 3-1>은 3점 사이클 집계방법 적용의 예를 단계적으로 설명해 준다. 우선

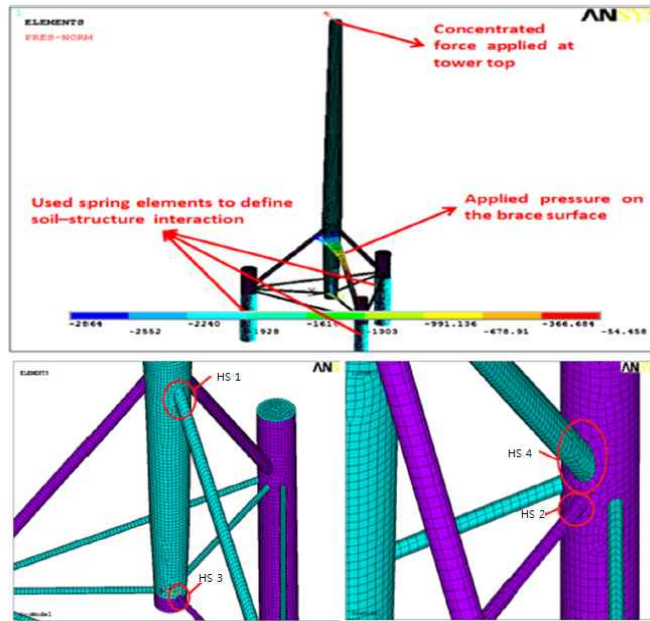
(a)단계에서 응력 시간이력이 주어지고 (b)에서는 주어진 시간이력의 최고 정점을 시작 첫 점으로 놓아서 재조정된다. 첫 점으로부터 시작해서 3점 비 흐름 집계법이 적용된다. 일단 3연속 응력점이 1사이클을 형성하면 하나의 닫힌 루프가 규정된다. 사이클을 형성하는 점들이 추출되고 새로운 시간이력이 (c)단계에 보이는 것처럼 사이클을 형성하는 앞뒤의 점들을 연결하여 생성된다. 단계(d-g)에서 같은 방식이 계속되고 사이클 집계법은 응력 점들이 (h) 단계에서 다 쓰일 때 종료된다.



<그림 3-1> 3점 비 흐름 사이클 집계법의 단계적 절차⁽⁵⁾

3-1-2. 시간영역 피로평가

동적 반응 분석은 풍력 및 파랑으로 유도된 하중에 해당되는 모든 하중 조건을 적용한다. 각 하중 조건에 대하여 4가지 다른 고 응력 위치가 조사되었다. 구조적 반응은 전단응력이 0이 되는 평면에 수직인 일차 주응력에 의해 결정된다. 일차 주 응력은 최대 인장 응력을 말하고 마이너스 값은 압축 응력이다. 가장 심한 영역은 중앙 기둥과 브레이스 튜브 부재가 연결되는 곳(HS1)에서 관측되었다. 다른 한 곳은 파일과 내부 기저가 연결되는 Y형의 근처(HS2)에서 탐지되었다. 세 번째 점은 중앙 기둥의 하부와 내부 기저사이의 T형 연결(HS3)에서 발생했다. HS4라고 부르는 마지막 것은 파일과 브레이스사이의 연결 주위에 위치했다(그림 3-2).



<그림 3-2> 삼각대 지지구조물의 고 응력 점 영역의 위치⁽⁵⁾

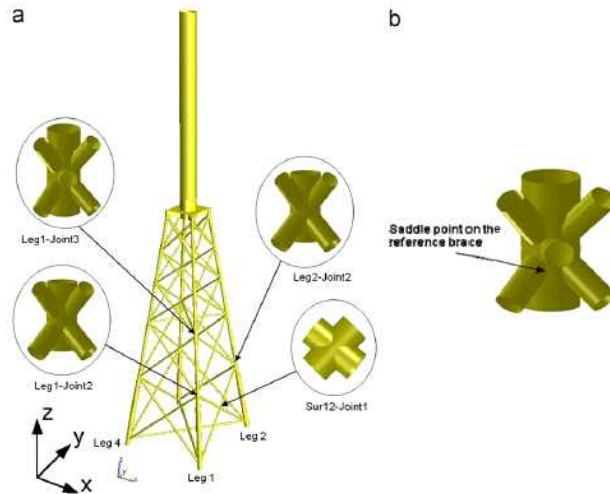
요약하면 현재 연구는 여러 하중조건을 받는 해상풍력 지지구조물의 시계열 피로 손상을 다룬다. 지지구조물의 다른 영역에서의 많은 고 응력 점들이 분석되었다. 각 고 응력 점과 관련된 응력 전달함수는 진동수 영역에서 동적 유한요소 분석에 의해 규정되고 연합된 파랑과 풍력으로 결합된다. 시간 이력에서 응력 사이클이 비 흐름 법에 의해서 집계되고 S-N 접근법이 피로 손상을 계산하기 위해 적용되었다. 브레이스 부품(HS1)은 하중 전달 용량에서 구조물의 매우 중요한 부품일 뿐 아니라 가장 심각한 피로 손상을 받는다.

3-2. 재킷지지 구조물

3-2-1. 시간영역 피로분석

수심 70m의 북해에 5MW 해상풍력터빈 재킷 지지구조물이 스코틀랜드에 설치되었다. 파랑 하중은 일 년에 10×10^7 이상이 될 수 있고 해수의 부식율은 0.04~1.2mm/년 사이를 변동할 수 있다. 로터의 지름은 126m, 타워 높이는 67m, 재킷 높이는 92m, 정격풍속 12m/s, 시작속도 6m/s 및 정지속도 25m/s이다.

서비스 수명 중 해상 구조물의 안전을 유지하기 위하여 마모, 검사, 모니터링 및 수리가 피로에 대한 중요한 수단이다. <그림 3-3>는 (a)재킷 튜브 조인트의 위치와 종류 (b) 고 응력 위치를 보여 준다.



<그림 3-3> (a)재킷 튜브 조인트의 위치와 종류 (b) 고 응력 위치⁽⁶⁾

3-2-2. 부식과 검사 효과를 고려한 피로 수명

용접튜브 조인트의 고 응력 부위의 부식에 대한 영향은 시간 변수를 곱해서 계산할 수 있다. 북해의 해상 석유 및 가스 경험을 바탕으로 재킷의 튜브 조인트 검사 신뢰성은 너무 의욕적이어서 표시된 설계기준의 이완이 검사기준에 대한 검사의 최대 효과를 나타낸다. 재킷지지 구조물의 장기 피로분석을 위한 시간영역 모사에서 통계적 불확실성 영향을 최소화하기 위하여 적어도 5~6회의 각 단계 환경조건을 위한 모사가 수행되어야 한다.

4. 하부지지 구조물의 지진하중

4-1. 모노파일 지지 구조물의 지진하중

4-1-1. 지진과 파랑 하중의 결합

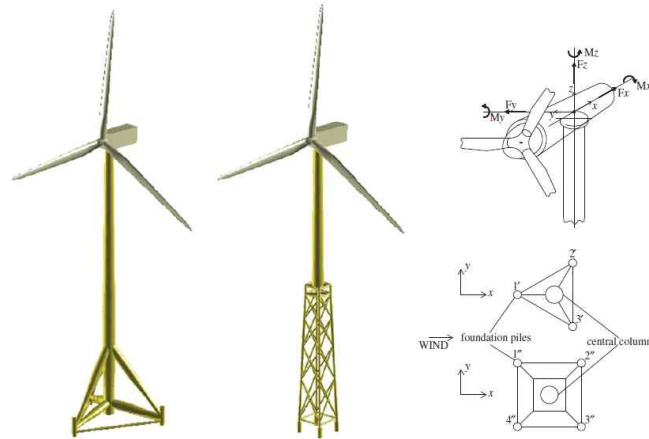
활성 지진지역에 있는 해상풍력 터빈은 지진과 해상 파랑활동의 공동력에 의하여 야기된 잠재적 위험 하에 놓여 있다. 5MW 풍력터빈이 강력한 지진과 완만한 파랑조건을 공동 활동을 받게 된다. 지진과 파랑의 공동 활동은 모노파일 하부 구조물 반응의 적절한 평가를 위해 중요하다. 실험적 데이터를 사용한 완만한 파랑조건에 의한 가속 반응은 완만한 지진에 비해 1:4에 비교할만하므로 우세한 지배력을 가정하면 지진 활동에 대한 파랑활동은 위험 할 수 있다.

4-2. 삼각대와 재킷 지지 구조물의 지진하중

4-2-1. 응력 결과와 타워 톱의 가속 요구

50m수심용 파일기초 위에 얹혀있는 삼각대와 재킷의 두 가지 하부지지 구조물 위의 5MW 수평축 풍력터빈의 지진반응을 조사하였다. <그림 4-1>은 삼각대 및 재킷지지 구조물의 파일기초와 및 양수 응력을 보여준다. 전체 시스템모델이 기초 모델을 고려하여

여러 하중조건에 대해 조합된 풍력 - 파력 - 지진하중 하에서 수행되었다,



<그림 4-1> 삼각대 및 재킷 지지조물의 파일기초 및 양수 응력⁶⁾

지진 하중은 보통의 침투 지반 가속도에서도 응력의 결과로 생긴 요구사항의 상당한 증가 원인이 된다. 전체 시스템 모델에서 완전하게 결합된 비선형 시간영역 모사가 현존하는 표준에 의하여 허용되는 단순화된 모델의 분석에 의하여 예측될 수 없는 로터 블레이드의 모멘트 요구에 관한 관련 정보를 획득하기 위하여 필수적이다.

삼각대와 재킷에서 LC1(지진하중, 작동 풍력·파력하중) - LC2(지진하중, 비상 정지 하중) - LC3(정지 상태에서의 지진하중, 풍력·파력하중)의 하중 경우에 타워기초의 모멘트 요구와 파일헤드의 축 방향 힘 요구 및 LC3 하중 상태의 블레이드 루트의 모멘트 요구는 지진 하중이 없는 대응하는 요구에 비해 상당히 증가한다.

삼각대와 재킷의 타워기초, 파일헤드의 모멘트 요구는 같은 범위이나, 블레이드루트에서의 최대 모멘트 요구는 항상 재킷에서 나타났다. 이 결과는 다른 질량 및 강성 분포가 두 지지구조물의 지진 응답에 결정적 역할을 하는 것을 보여 준다

5. 하부 지지구조물의 다중 기준 평가

5-1. 5.5MW, 수심 40m의 하부 지지구조물의 설계 최적화

5-1-1. 환경 영향 평가

채광, 운송, 처리 및 생산으로부터 강의 생산에 관련된 다른 하부지지 구조물의 CO₂ 배출은 <표 5-1>과 같다.

<표5-1> 다른 지지 구조물의 CO₂ 배출⁽⁷⁾

	강의 질량	N ₂ O(kg)	CH ₄ (kg)	CO(kg)	CO ₂ e
모노파일	811365	57	32	755	17191
삼각대	1689552	118	68	1571	35788
재킷	2447038	171	98	2276	51833

등가 CO₂(CO₂e)는 삼각대 지지구조가 모노파일 보다는 중량이 2배이므로 발생량이 크지만 재킷보다 70% CO₂를 덜 발생 시키는 것을 볼 수 있다.

5-1-2. 설계 최적화

구조물 모델이 FEM에 기초한 강력한 공학 소프트웨어 도구인 Abaqus/CAE로 개발되었다. 여러 반복 끝에 구조물 부재의 치수가 최적화 되었다. 최적 모노파일 설계, 최적 삼각대설계 및 최적 재킷설계의 결과가 <표 5-2>, <표 5-3> 및 <표 5-4>에 제시되었다.

<표 5-2> 최적 모노파일 설계⁽⁷⁾

	길이(m)	지름(m)	두께(m)
타워 톱	87.6	4.1	0.013
타워 바탕	87.6	6	0.021
연결 부분	10	7	0.04
파일	35 + 40	7	0.04

<표 5-3> 최적 삼각대 설계⁽⁷⁾

	길이(m)	지름(m)	두께(m)
연결 부분	10	8	0.4
중앙 기둥	15	8	0.04-0.08
브레이스	36,06	4.1	0.026
기반	20-34.64	2.1	0.016
파일	35	3.6	0.04

<표 5-4> 최적 재킷 설계⁽⁷⁾

	길이(m)	지름(m)	두께(m)
타워	87.6	5.1-7.02	0.02-0.028
수평 브레이스	16.4-24.8	2.1	0.016
대각선 브레이스	22.69-27.30	2.1	0.016
수평 긴 브레이스	23.19-42.42	2.1	0.016
파일	33.3	5	0.04

6. 결론

꾸준히 증가하는 수심에 풍력터빈의 배치가 가장 적합한 지지 구조물의 적절한 선택의 문제를 제기하였다. 해상 석유 및 가스 산업으로부터의 경험과 기술에 근거하여 모노파일, 삼각대 및 재킷의 3개의 형상이 다른 운영조건을 위해 제안하였다.

국내 서남해상의 부안·영광에 위치한 2.5 GW 해상풍력 단지는 5MW, 수심 33m인 해상풍력의 하부 구조물에서 삼각대 하부지지 구조물이 모노파일 보다 파랑 공진의 피해를 덜 받아서 최선의 선택이다. 모노파일은 가벼워서 경제적인 선택이고 재킷은 중량이 무거워서 경제적으로 최악의 선택이다.

삼각대 구조물이 모노파일 구조물보다 더 큰 강성을 가졌다. 사례 연구에서 모노파일 구조물의 최대응력과 변형이 삼각대 구조물의 것 보다 2.3과 1.3배 더 컸다. 삼각대 구조물이 모노파일 구조물 보다 더 강성이 크고 더 좋은 응력 제어 능력을 가진 것을 보여 주었다. 삼각대 하부지지 구조물은 풍속하중, 풍랑하중, 난류하중, 태풍하중, 피로하중 및 지진하중에 잘 적응하고 경제적으로도 재킷보다 경제적이어서 전체적으로 최상의 선택이다.

<참고문헌>

1. 嶋田健司, “洋上風車支持構造”, *日本風力エネルギー學會誌*, 38(3), 2014, pp.274~277
2. 嶋田 健司, 本島 禎二, 難波 治之, 吉田 茂雄, 石原 孟, “モノパイル式洋上ウィンドファームのフィージビリティスタディ”, *第34回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演*, 2017, pp. 199~202
3. Hezhen Yang, Yun Zhu, Qijin Lu, Jun Zhang, “Dynamic reliability based design optimization of the tripod sub-structure of offshore wind turbines”, *Renewable Energy*, 78, 2015, pp. 16~25
4. Da Chen, Kai Huang, Valentin Bretel and Lijun Hou, *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, pps. 1~9
5. B. Yeter, Y. Garbatov, C. Guedes Soares, “Fatigue damage assessment of fixed offshore wind turbine tripod support structures”, *Engineering Structures*, pp. 518~526
6. Wenbin Dong, Torgeir Moan, Zhen Gao, “Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection”, *Reliability Engineering and System Safety*, 106, 2012, pp.11 - 27
7. Natale Alati, Giuseppe Failla and Felice Arena, “Seismic analysis of offshore wind turbines on bottom-fixed support structures”, *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES*, 373, 2015, pp.1~23

8. Xiang Yuan Zheng, Hongbin Li, Weidong Rong, Wei Li, "Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: An experimental study", *Marine Structures*, 44, 2015, pp.125~141
9. E. Lozano-Minguez, A.J. Kolio, F.P. Brennan, "Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures", *Renewable Energy*, 36, 2011, pp.2831~2837

<관련기술목록>

1. S. Bhattacharya, S.Adhikari, "Experimental validation of soil - structure interaction of offshore wind turbines", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 2011, pp.805 - 816
2. Wenbin Donga, Torgeir Moana,b, Zhen Gaoa, "Long-term fatigue analysis of multi-planar tubular joints for jacket-type offshore wind turbine in time domain", *Engineering Structures*, 33, 2011, pp.2002~2014
3. L.V. Andersen, M.J. Vahdatirad", M.T. Sichani, J.D. Sørensen, "Natural frequencies of wind turbines on monopile foundations in clay soils – probabilistic approach", *Computers and Geotechnics*, 43, 2012, pp 1~11
4. Swagata Bisoi, Sumanta Haldar, "Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil - monopile - tower interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 2014, pp19~35
5. Wei Shi, Hyunchul Park, Jonghoon Han, Sangkwon Na, Changwan Kim, "A study on the effect of different modeling parameters on the dynamic response of a jacket-type offshore wind turbine in the Korean Southwest Sea", *Renewable Energy*. 58, 2013, pp50~59
6. Wei Shi, Jonghoon Han, Changwan Kim, Daeyong Lee, Hyunkyung Shin Hyunchul Park, "Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea", *Renewable Energy*, 74, 2015, pp.406~413
7. Dan Kallehave, Byron W. Byrne, Christian LeBlanc Thilsted, and Kristian Kousgaard Mikkelsen, Optimization of monopiles for offshore wind turbines", *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES* , A 373, 2017, pp.1~15
8. K.A. Abhinav, Nilanjan Saha, "Coupled hydrodynamic and geotechnical analysis of jacket offshore wind turbine", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 73, 2015, pp.66~79
9. Yeon-Seung Lee, Byung-Lyul Choi, Ji Hyun Lee, Soo Young Kim,

- Soonhung Han, "Reliability-based design optimization of monopile transition piece for offshore wind turbine system", *Renewable Energy*, 71, 2014, pp.729~741
10. Mohammad-Amin Asareh, William Schonberg, JefferyVolz, "Fragility analysis of a 5-MW NREL wind turbine considering aero-elastic and seismic interaction using finite element method", *Finite Elements in Analysis and Design* 120, 2016, pp.57~67
 11. Yu-Kai Wang, Juin-Fu Chai, Yu-Wen Chang, Ti-Ying Huang and Yu-Shu Kuo, "Development of Seismic Demand for Chang-Bin Offshore Wind Farm in Taiwan Strait", *ENERGIES*, 9(12), 2016, pp.2~19
 12. 嶋田 健司, 石原 孟, "衝撃碎波力が作用する洋上風力発電設備支持構造物の断面力評価", *第32回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演*, 2013, pp.195~198
 13. 谷垣信, 本田明弘, 岡俊藏辯, 池末俊一, "着底式洋上風車における海底地盤の影響", *第17回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演*, 2005, pps. 199~202



이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.