

해상풍력발전 석션기초의 강성산정 방법에 따른 영향 분석 The Influence of Suction Foundation Models for Offshore Wind Turbine

장화섭* · 남현우* · 곽연민* · 윤세웅* · 김호선*

Hwa Sub Jang*, Hyun Woo Nam*, Yeon Min Kwak*, Se Woong Yoon* and Ho Sun Kim*

요 지 : 석션기초는 해양분야의 기초 및 앵커로 널리 사용되고 있으며, 최근 들어 해상풍력발전기의 기초로도 그 활용 범위가 확대되고 있다. 많은 선행 연구로부터 기초구조물의 강성이 해상풍력발전기의 동적응답에 영향을 줄 수 있기 때문에 기초구조물에 대한 적절한 모델링이 필요한 것으로 입증된 바 있다. 본 논문에서는 3차원 유한요소 해석을 수행하여 석션기초의 강성행렬을 산정하였다. 이를 기존의 중력식 기초 강성 산정식에 의한 결과와 비교하였으며, 산정한 강성행렬을 적용하여 구조물의 동적응답과 고유진동수 검토를 위한 통합하중해석을 수행하였다. 해석 결과 mudline에서 발생하는 하중에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타났지만, 기초를 고정단으로 모델링한 경우 고유진동수가 최대 약 10% 과대 예측하는 것으로 나타났다. 풍력발전기 공진 회피에 대한 검토 시 기초강성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 해상풍력발전, 석션기초, 강성행렬, 수치해석, 통합하중해석

Abstract : Suction piles have been widely used as foundations and anchor systems in offshore industry, and recently, it have been tried to be used as foundations for offshore wind turbines. Many researches have shown that stiffness of a foundation could effect dynamic responses of a offshore wind turbine so that appropriate modeling application of wind turbine foundations is recommended. In this paper, we calculate a stiffness matrix of a suction foundation through 3D FEM analysis and compare the results with the ones calculated by conventional formula for estimating stiffness of shallow foundations. And then we carry out integrated load analysis for the evaluation of dynamic responses and natural frequencies of the structure using the calculated stiffness matrix. The results shows that the effect of load in the mudline is not large, but in the case of assuming the foundation as a fixed support, the natural frequency is over-estimated up to 10%. Therefore, considering stiffness of foundations is recommended when you evaluate the natural frequencies of wind turbine structures.

Keywords : Offshore wind turbine, Suction foundation, Stiffness matrix, Finite element analysis, Integrated load analysis

1. 서 론

화석연료 고갈에 대비한 세계 각 국의 신재생에너지 개발이 활발해지고 탄소배출에 대한 국제 환경 규제가 심화되고 있는 가운데 세계 해상풍력 발전 보급 용량은 빠른 속도로 증대되고 있다. 또한 우리나라에서도 주요 신재생에너지 개발 사업의 일환으로써 다양한 해상풍력발전단지 사업이 계획/진행 되고 있다. 풍력터빈이 공사비의 대부분을 차지하는 육상 풍력발전과 달리 해상풍력발전의 경우 지지구조물의 공사비가 해상풍력발전단지 전체 공사비의 약 25% 이상을 차지한다(Make consulting, 2011). 이에 따라 전체 시스템의 안전성 및 경제성을 결정하는 주요 구조물인 지지구조 개발이 국내 외에서 활발하게 이루어지고 있으며, 타 해양산업분야의 기초 및 앵커시스템으로 활용되어온 석션기초의 해상풍력발전

기 활용에 대한 관심도 점차 증가하고 있다.

석션기초(suction 또는 bucket foundation)는 강재 또는 콘크리트 벽으로 구성되고 하부가 열려있는 실린더 형태의 기초로써 해저 침수 후 기초 내 해수를 외부로 배출시킬 때 생기는 압력차로 기초를 지반에 근입 및 정착시키는 기초형태이다. 압력차를 이용해 기초를 관입시키기 때문에 소음과 부유물질 발생이 적으며, 특히 대형 굴착 및 항타 장비가 불필요해 해상 작업성 및 경제성이 우수하다. 수심이 깊을수록 큰 관입력을 확보할 수 있어 주로 해양구조물의 앵커시스템 또는 석유 시추 플랫폼의 기초로 사용되어져 왔다. 2002년부터 덴마크의 Frederikshavn, 독일의 Wilhelmshaven, 영국의 Bothkennar 등에서 해상풍력 기초 적용을 위한 실증 테스트를 수행하고 있으며, 2009년 Horns Rev 2 해상풍력발전단지 및 2013년 영국의 Dogger Bank에 기상탑 기초로 활용되는

* (사)한국선급 연구소(Corresponding author : Kim Ho Sun, Research Center, Korean Register, Busan, 46762, Republic of Korea, Tel: +82-70-8799-8721, Fax: +82-70-8799-8774, kimhs@krs.co.kr)

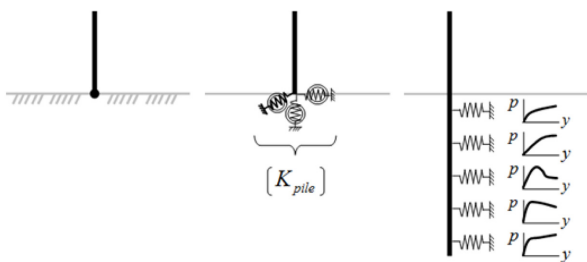
등 점차 그 적용 범위가 확대되고 있다.

해상풍력발전기에는 바람, 파도, 조류 등 다양한 해양하중과 기상하중이 작용하며, 작용하중에 대한 구조물의 동적 응답 및 고유진동수 계산을 위하여 통합하중해석을 수행한다. 이때 풍력발전기 거동을 보다 정확하게 예측하기 위하여 기초구조물을 고정단이 아닌 스프링으로 치환하여 기초와 지반의 상호작용을 고려하여 해석한다. 많은 선행 연구로부터 기초구조물의 강성 산정방법에 따라 구조물의 동적응답 및 고유진동수가 달라질 수 있으며 해상풍력발전기의 통합하중해석 시 적절한 기초구조물 모델링이 필요함이 입증된 바 있다 (Bush and Manuel, 2009; Andersen et al., 2009).

본 연구에서는 석션기초 강성 산정방법에 따른 해상풍력발전기의 고유진동수 및 기초구조물에 전달되는 시스템하중에 대한 영향을 규명하였다. 3차원 유한요소해석을 수행하여 지반에 설치된 원형 석션기초의 하중-변위 곡선을 산정하였으며 lumped-parameter 모델을 적용하여 석션기초의 강성 행렬을 산정하였다. 기초 강성 행렬을 적용하여 통합하중해석을 수행하였으며 구조물의 고유진동수 및 기초구조물에 전달되는 하중의 변화를 확인하였다. 계산된 고유진동수 및 하중은 Rigid-Base, 중력식 기초의 강성 산정식(DNV)을 적용하여 수행한 해석 결과와 비교하였으며 전체구조물의 응답 특성을 평가하였다.

2. 석션기초 강성행렬 산정

해상풍력발전기의 거동 분석을 위한 통합하중해석에서 기초구조물을 모델링 하는 방법은 크게 지반을 고정단으로 모델링하는 Rigid-Base 모델과 지반과 기초구조물의 상호작용을 고려하여 구조물에 강성 행렬을 적용하는 모델로 구분할 수 있다(Fig 1). 여기서 강성 행렬을 적용하는 모델은 mudline에서 지반에 근입된 기초와 지반의 대표 행렬을 입력하는 lumped-parameter 모델과 깊이별로 절점마다 강성을 입력해주는 winkler 모델로 구분된다. Lumped-parameter 모델은 기초부의 강성을 나타내는 스프링을 이용해 모델링 하는 방법으로 식 (1)과 같이 10가지 자유도에 대한 스프링 계수를 이용하여 모델링한다. 단, 원형인 석션기초의 경우 축대칭에 따라 $K_{11}=K_{22}$, $K_{44}=K_{55}$, $K_{15}=K_{24}$ 가 성립하므로 6가지의 자유도에 대한 스프링 계수가 필요하다.



(a) Fixed model (b) Lumped-parameter model (c) Winkler model

Fig. 1. Foundation stiffness model.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & K_{51} & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & K_{42} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{24} & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ K_{15} & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 K_{11} , K_{22} 는 수평스프링, K_{33} 은 연직스프링, K_{44} , K_{55} 는 Rocking스프링, K_{66} 은 Torsion스프링, K_{15} , K_{24} , K_{42} , K_{51} 은 전단력과 휨모멘트간의 상호 간성에 대한 스프링을 각각 의미한다.

Winkler 모델은 일반적으로 API(2010), DNV(2013) 등에서 제안한 p-y curve를 적용해 모델링한다. 하지만 p-y curve는 소구경 pile에 대해 제안된 값이기 때문에 중력식 기초 형상과 유사한 석션기초의 경우 적합한 모델이라고 볼 수 없다 (Lesny et al., 2007; Reese, 2001; TRB, 2011).

본 연구에서는 lumped-parameter 모델을 적용하여 석션기초의 강성 행렬을 산정하였다. 이를 위하여 DNV-OS-J101(DNV, 2013)에서 제안한 중력식 기초의 강성 산정식과 유한요소해석을 통한 수치해석적 방법을 이용하였다.

DNV-OS-J101에서는 Fig. 2와 같이 균일한 지반에 근입된 중력식 기초에 대하여 탄성이론으로 계산한 등가 스프링 계수를 다음과 같이 제안하였다.

$$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H} \right) \left(1 + \frac{D}{2R} \right) \left(1 + \left(0.85 - 0.28 \frac{D}{R} \right) \frac{D/H}{1-D/H} \right) \quad (2)$$

$$K_H = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H} \right) \left(1 + \frac{2D}{3R} \right) \left(1 + \frac{5D}{4H} \right) \quad (3)$$

$$K_R = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H} \right) \left(1 + 2 \frac{D}{R} \right) \left(1 + 0.7 \frac{D}{H} \right) \quad (4)$$

$$K_T = \frac{16GR^3}{3} \left(1 + \frac{8D}{3R} \right) \quad (5)$$

여기서 K_v 는 연직스프링, K_H 는 수평스프링, K_R 은 Rocking

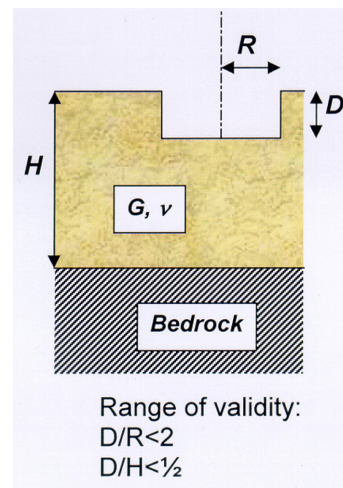


Fig. 2. Circular footing embedded in stratum over bedrock(DNV, 2013).

스프링, K_T 는 Torsion스프링, G 는 지반의 전단탄성계수, R 은 기초의 반경, H 는 토층의 두께, D 는 기초의 근입깊이, ν 는 지반의 포아슨 비를 각각 의미한다.

중력식 기초 강성 산정식의 경우 수평변형과 회전변형 사이에 존재하는 상호작용(Coupling)은 별도로 제안되어있지 않다.

수치해석적 방법으로 대상지반에 설치된 석션기초의 강성행렬을 산정하기 위해 유한요소해석 프로그램인 Abaqus(Simulia, 2010)의 Standard 모듈을 이용하였다. 수직, 수평, 모멘트 및 비틀림에 대한 강성을 산정하기 위하여 지반과 석션기초는 3차원 전체 크기(full size)로 모델링하였으며, 기초와 지반은 모두 Abaqus에 내장되어 있는 C3D8(8 node linear brick) 솔리드(solid)요소를 사용하였다(Fig. 3). 석션기초의 직경과 길이, 벽체두께는 각각 17 m, 14 m, 0.5 m이고, 하중작용 시 기초 모델은 상판의 중앙 하단에 지정된 기준점(reference point)을 따라 모든 절점이 이동하여 변형이 발생하지 않는 강체(rigid body)로 모델링하였다.

전체 원통형의 지반모델은 해석 시 경계조건의 영향을 받지 않도록 직경과 길이를 각각 석션기초 직경의 12배와 6배

크기로 모델링하였으며, 지반모델의 측면과 하단은 각각 수평과 수직방향 변위를 고정하였다. 해석격자는 기초 주변지반에는 길이 1 m의 정육면체를 적용하였으며, 기초로부터 멀어질수록 크기를 증가시켜 해석의 정확성을 높이는 동시에 시간을 단축하고자 하였다.

해석 순서는 다음과 같다. 먼저 Geostatic 단계에서 중력에 의한 초기 지중응력 상태를 구현하고 다음 단계에서 자중에 의해 기초가 설치되도록 한다. 이때 지반과 기초 사이의 인터페이스(interface)를 활성화한다. 그 다음 강성행렬 각 요소마다의 변위-하중 비선형 곡선을 산정하기 위하여 기준점에서의 변위제어 방법을 적용한다. 즉, 수직, 수평, 모멘트와 비틀림의 강성을 각각 산정하기 위하여 총 4회의 해석을 수행하고, 모든 경우에서 변위가 작용하는 방향을 제외한 다른 방향으로의 이동이 없도록 변위를 제한한다.

대상지반으로 사질토 층과 점성토 층 각각 일반적으로 사용되는 Mohr-Coulomb과 Tresca 구성모델을 사용하였다. SPT 결과를 토대로 해석에 적용된 각 층의 물성치는 Table 1과 같다. Table 1에서 γ' 는 수중단위중량, E 는 탄성계수, ν 는 포아슨 비, ϕ 는 내부마찰각, ψ 는 팽창각, c 는 점착력을 각각 의미한다.

석션기초와 사질토 지반 사이의 인터페이스는 수직방향으로 분리를 허용하고 접촉이 된 경우에만 하중이 전달되는 Hard contact 조건을 적용하였으며, 전단방향으로는 지반과 기초 사이의 마찰각(δ)을 사질토 지반 마찰각의 2/3로 하였다.

Table 1. Soil profiles for simulation

Layer	Depth (m)	γ' (kN/m ³)	E (MPa)	ν	ϕ (°)	ψ (°)	c (kPa)
Sand 1	0~32	8.7	29	0.3	36	6	1
Clay	32~42	8.2	25	0.49	-	-	17
Sand 2	42~62.5	8.7	30	0.3	36	6	1
Weathered soil	62.5~67	9.0	40	0.3	38	8	10
Soft rock	67~	11.0	330	0.3	40	10	100

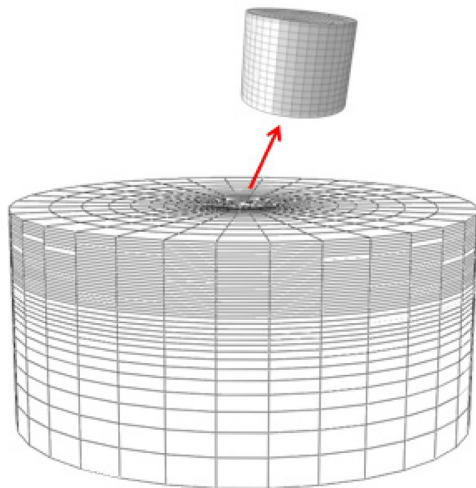


Fig. 3. Mesh and foundation model for simulation.

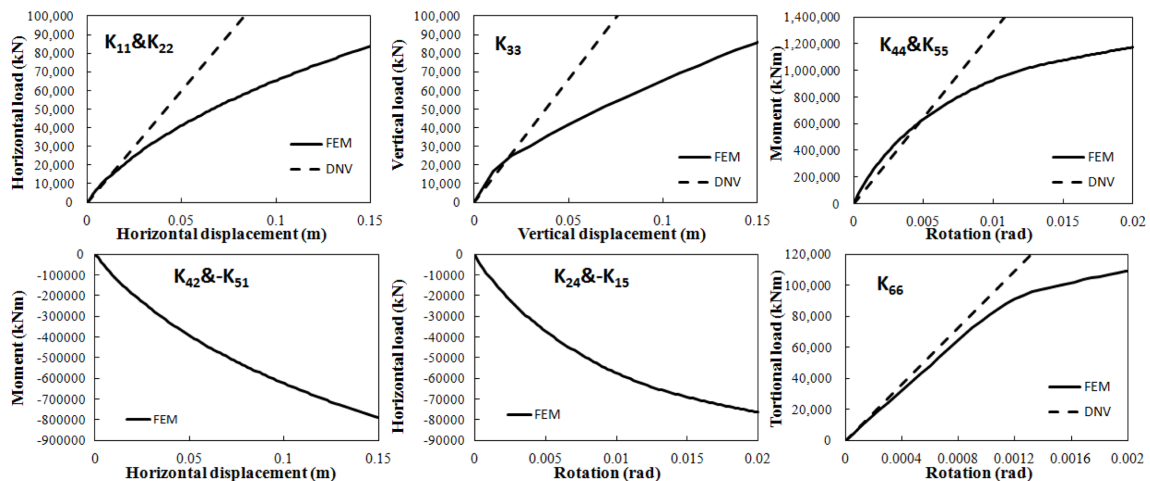


Fig. 4. Comparison of Load-settlement curve.

석선기초는 파괴가 발생하지 않는 탄성으로 모델링하였으며, 수중단위중량(γ')은 14 kN/m^3 을 적용하였다.

중력식 기초의 강성 산정식으로 구한 등가 스프링과 유한 요소 해석으로 구한 하중-변위 곡선을 비교하였다(Fig. 4). 강성산정식의 경우 변형량이 증가할수록 FEM 결과와 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 강성 행렬은 통합하중해석에 적용되었다.

3. 통합하중해석 수행 모델

3.1 해상풍력발전기 해석조건

본 절에서는 기초의 강성산정 방법에 따른 해상풍력발전기의 거동을 평가하기 위해 풍력터빈 하중해석용 상용 소프트웨어인 Bladed를 이용하여 해석을 수행하였다(GL, 2013). 해석은 IEC61400-3에 규정된 해상풍력발전기 설계 시 요구되는 외부환경조건과 구조설계에 필요한 설계하중조건을 고려하여 수행되었다. 통합하중해석에 사용된 해상풍력발전기 모델은 NREL에서 개발한 5MW Reference모델(Fig. 5)이며 이때 하중조건은 DLC6.1a로써 해상풍력 터빈의 로터가 정지(standstill) 또는 아이들링(idling) 상태인 파킹조건을 적용하였다(Table 2).

기초의 강성산정 방법에 따른 영향을 분석하기 위하여 기초구조물의 모델을 기초구조물을 Rigid로 모델링한 경우와 중력식 기초의 강성 산정식으로 lumped-parameter 모델을 산정한 경우, 수치해석으로 nonlinear lumped-parameter 모델을 산정한 경우의 해석 결과를 각각 비교하였다.

4. 해석결과

4.1 고유진동수 검토

풍력발전기의 하부구조물 설계 시 우선적으로 고려해야할

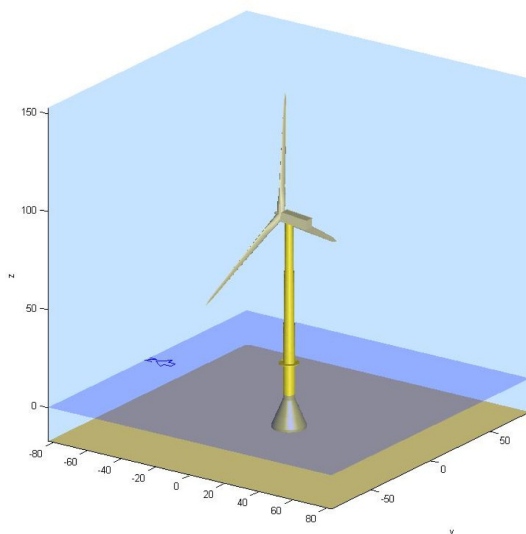


Fig. 5. Offshore wind turbine system for Loads Analysis.

사항은 공진(resonance)의 회피이다. 풍력발전기의 주요 외력(exciting force)은 바람에 의한 로터의 회전(rotating frequency)과 각 날개가 회전할 때 마다 발생하는 통과주파수(passing frequency)이다.

일반적으로 로터의 동작 주파수와 블레이드 통과 주파수에 5%를 벗어나도록 하부구조물의 1차 고유진동수의 설계범위를 설정하며 구조물이 고유진동수의 설계범위 이내로 설계가 되었다면 공진을 회피한다고 볼 수 있다. 하중해석에 사용된 발전기 모델의 작동범위는 $6.9 \sim 12.1 \text{ rpm}$ 이고, 설계범위를 고려할 때 본 구조물 모델의 1차 고유진동수가 $0.212 \text{ Hz} \sim 0.328 \text{ Hz}$ 범위 내에 존재한다면 규정에 적합하다고 볼 수 있다. GL GH-Bladed를 이용하여 기초구조물의 강성 모델에 대한 Modal 해석을 수행한 결과는 Table 3과 같다. Rigid 모델의 경우 side-side, fore-aft 방향의 1차 모드의 공진주파수가 각각 $0.320, 0.322 \text{ Hz}$ 으로 FEM 모델보다 약 10% 정도 크게 산정되었다. DNV 모델의 경우 FEM 모델과 비교하여 모드별 2~4% 정도 크게 산정되었다. Rigid 모델의 경우 공진주파수를 과대평가 하므로 고유진동수를 정확하게 예측하기 위해서는 기초구조물의 강성을 고려해야할 것으로 판단된다.

Table 2. Load Case for Analysis(IEC, 2009)

Design Load Case:	DLC6.1a				
Operating condition:	Idling				
External condition:	Extreme Wind Model (Turbulent) $V_{hub}=V_{50}$ ESS, ECM, EWLR				
Type of analysis	Ultimate				
Partial safety factor	1.35				
Description of Simulations:					
	Mean wind speed [m/s]	H_s [m]	T_p [s]	Yaw error [deg]	Wind/wave misalignment [deg]
6.1a	42.5	7.40	15.19	8	0
Comments:	<ul style="list-style-type: none">· Three dimensional non-isotropic Mann turbulent field· Six turbulent wind seeds per wind speed bin(indexed 1-6)· Wind gradient, $a = 0.11$· Extreme current of 0.88 m/s applied· HSWL: $4.223 + 17.2 = 21.423$ m				

Table 3. Modal Frequencies

Case	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
	side-side	fore-aft	torsional	side-side
Rigid	0.320	0.322	1.413	1.869
DNV	0.298	0.300	1.450	1.728
FEM	0.291	0.293	1.395	1.647

4.2 Mudline에서의 하중비교

극한하중은 Mudline에서의 최대/최소하중을 구하였다. 해석결과와 극한하중은 전술한 설계하중조건들의 시뮬레이션 결과로써 IEC61400-3의 설계하중조건에서 정의된 부분안전계수를 적용한 값이다. 여기서 사용된 좌표계는 x축이 타워의 주축 방향, y축은 풍향과 일치하는 방향, z방향은 x와 y축의 수직방향을 의미한다. 따라서 M_y 는 side-side 모멘트, M_z 는 fore-aft 모멘트로 적용된다(Fig. 6).

풍력발전기 하부경계 조건에 따른 해석결과를 비교해보기 위하여 각각의 경계조건과 DLC 6.1 하중조건을 적용하여 통합하중해석을 수행하였으며 Mudline에서 모멘트 하중의 시

간이력 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

통합하중 해석에서 계산된 하중을 비교한 결과는 Table 4와 같다. 표에서의 값은 극한하중의 시간이력에서 절대 값을 정리한 것이다. 해석 결과 Rigid 모델과 DNV 모델의 극한하중은 M_z , F_z (side-side)가 8% 정도 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 다른 성분의 극한하중은 3% 이하의 차이가 발생하였다. FEM 모델을 적용한 경우 M_z , F_z 에 대하여 10~25% 정도 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 본 논문에서 사용된 지반 조건과 하중 조건에서는 Rigid 모델과 DNV 모델의 극한하중 해석결과는 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났으며, FEM 해석을 통하여 구한 기초의 강성행렬

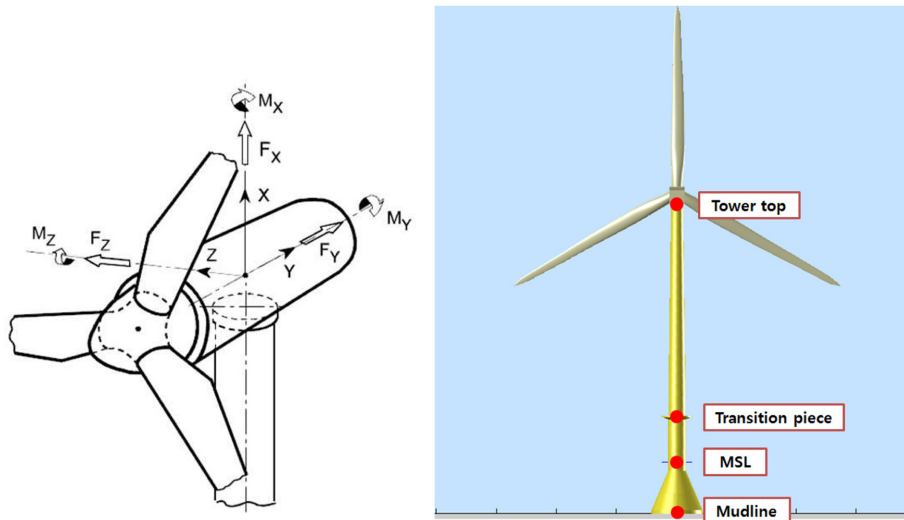


Fig. 6. Coordinate system and offshore wind turbine models.

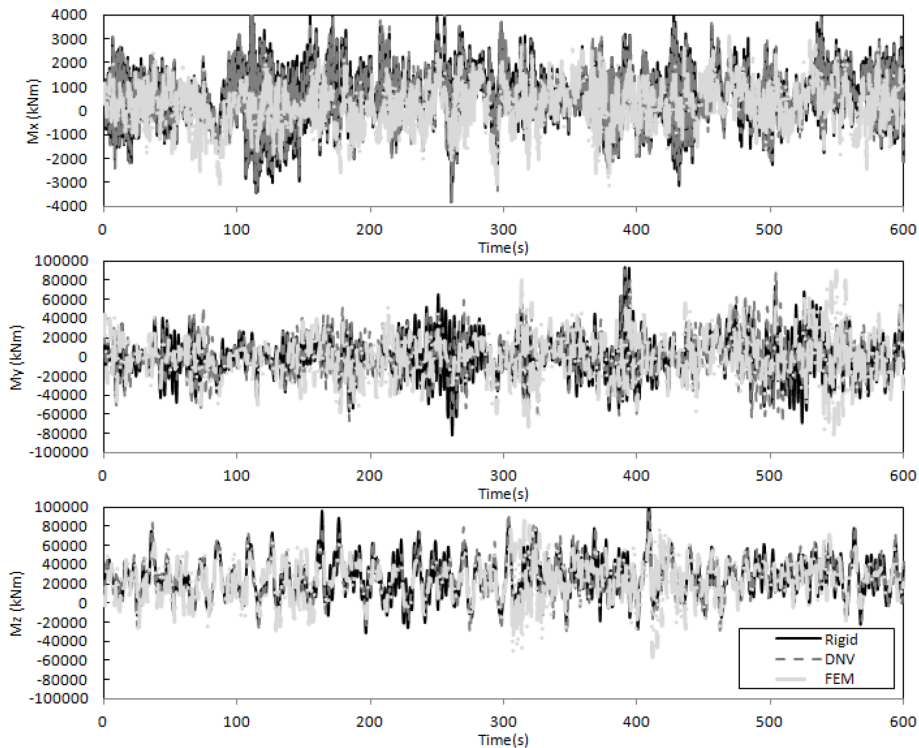


Fig. 7. Time history of the moments.

Table 4. Ultimate loads at mudline

Case	Mx(kNm)	My(kNm)	Mz(kNm)	Fx(kN)	Fy(kN)	Fz(kN)
Rigid	5895	125374	138340	-85238	10014	-1218
DNV	6037	121815	127797	-85230	10221	-1330
FEM	-4338	121368	115464	-85391	7175	1620

을 사용할 경우에는 다른 기초강성 모델들과 비교하여 큰 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램을 사용하여 기초강성 산정방법에 따른 해상풍력발전기의 동적응답 및 고유진동수에 대한 영향을 규명하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 수치해석으로 산정한 강성행렬을 검증하기 위하여 중력식기초 강성산정식으로 계산된 결과와 수치해석결과를 비교하였다. 변형률이 증가할수록 강성결과의 차이가 크게 나는 것을 볼 수 있으며 매우 큰 변형이 발생하는 경우에는 수치해석을 통한 강성행렬이 필요할 것으로 판단된다.

(2) 석션기초 강성산정 방법이 고유진동수에 미치는 영향을 분석한 결과 Rigid 모델의 경우 1차 모드의 공진주파수가 다른 모델들보다 10% 정도 크게 나타났다. Rigid 모델의 경우 공진주파수를 과대평가 하므로 고유진동수를 정확하게 예측하기 위해서는 기초구조물의 강성을 고려하여 해석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

(3) 하중해석은 DLC 6.1a에 대해 수행했으며 mudline에서의 극한 하중을 비교한 결과 FEM모델의 결과가 10~25% 정도 다르게 예측하는 것으로 나타났다. DLC 6.1a의 결과로 볼 때 풍력 발전기가 파킹 상태에서는 하중이 지반 모델링에 따라 차이가 있는 것으로 확인되었다. 풍력 발전기가 운전 상태인 경우에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 연구비 지원(과제명:해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술 개발/20120093)을 받아 수행되었습니다.

References

- Andersen, L., Ibsen, L. and Liingaard, M. (2009). Lumped-parameter model of a bucket foundation, in S. Pietruszczak, G. N. Pande, C. Tamagnini & R. Wan(eds), Computational Geomechanics: COMGEO I, IC2E International Center for Computational Engineering, 731-742.
- API (2010). Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms, Rp2a-wsd, American Petroleum Institute, Dallas, Texas, United States of America.
- Bush, E. and Manuel, L. (2009). "The influence of foundation modeling assumptions on long-term load prediction for offshore wind turbines", Proc. of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, May 31-June 5.
- DNV (2013). DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine structures, Det Norske Veritas.
- GL (2013). Bladed User manual, Garrad Hassan & Partners Ltd.
- IEC (2009). IEC 61400-3 Wind Turbines. Part 3: Design Requirements for offshore wind turbines, International Electrotechnical Commission.
- Lesny, K., Paikowsky, S.G. and Gurbuz, A. (2007). Scale Effects in Lateral Load Response of Large Diameter Monopiles, Contemporary Issues in Deep Foundations (GSP 158).
- Make consulting (2011). Offshore wind power development.
- Reese, L.C., Impe, W.F. van, Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading, The Netherlands, 2001.
- Simulia (2010). Abaqus user's manual, Dassault Systemes Simulia Corp.
- TRB (2011). Structural Integrity of Offshore Wind Turbines, Transportation Research Board, Special Report 305.

Received 7 September, 2015

Revised 30 September, 2015

Accepted 1 October, 2015