풍력 구조물의 진동 특성 분석을 위한 지반-구조물 상호작용 모델의 비교 연구

김 정 수^{1†}

¹한국건설기술연구원 스마트건설혁신본부 국가BIM연구센터 전임연구원

Comparative Study on Soil-Structure Interaction Models for Modal Characteristics of Wind Turbine Structure

Jeongsoo Kim^{1†}

¹Research Specialist, Korea BIM Research Center, Department of Smart Construction, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

Abstract

In this study, natural frequencies are compared using several pile-soil interaction (PSI) models to evaluate the effects of each model on resonance safety checks for a monopile type of wind turbine structure. Base spring, distributed spring, and three-dimensional brick-shell models represented the PSIs in the finite element model. To analyze the effects of the PSI models on a natural frequency, after a stiffness matrix calculation and Winkler-based beam model for base spring and distributed spring models were presented, respectively; natural frequencies from these models were investigated for monopiles with different geometries and soil properties. These results were compared with those from the brick-shell model. The results show that differences in the first natural frequency of the monopiles from each model are small when the small diameter of monopile penetrates hard soil and rock, while the distributed spring model can over-estimate the natural frequency for large monopiles installed in weak soil. Thus, an appropriate PSI model for natural frequency analyses should be adopted by considering soil conditions and structure scale.

Keywords : pile-soil interaction, wind turbine monopile foundation, natural frequency, resonance safety check

1. 서 론

모노파일 및 자켓식과 같은 고정식 풍력 지지구조물은 터빈 및 타워구조물을 지지하기 위해 지반으로의 관입이 불가피하며, 지반과 구조물의 상호작용에 따라 상이한 거동이 나타나게 된다. 특히 외력 주파수와 전체 구조물의 고유주파수 영역과 겹치게 되면, 공진과 같은 큰 진동 응답이 발생할 수 있어 이를 회피하기 위한 사전 평가 작업이 설계과정에서 중요하게 다뤄진다(Lee *et al.*, 2016).

풍력 시스템의 허용 주파수는 로터의 1회전 주기(1P) 및 3개 블레이드 통과 주기(3P) 이내에 전체 시스템의 고유 주파수가 위치해야 한다(Kim *et al.*, 2016a). 설계과정에서 지지구조물

및 기초 영향을 고려한 발전기 제조사에 의해 터빈하중의 평가와 이를 반영한 지지구조물의 구조적 안전성뿐만 아니라 공진 안정성 평가가 개념, 기본, 실시 설계과정에서 반복적으로 이뤄지므로, 정확한 고유진동수 평가가 요구된다. 특히, 풍력 구조물의 허용 설계 주파수는 발전기 제조사에 따라 다소 차이가 존재하나 일반적으로 좁은 범위를 가지므로 정확한 고유진동수 평가는 설계에 소요되는 노력을 저감하는데 크게 기여할 수 있다.

최근 해상 풍력 발전 시스템의 설치 대상 지역이 확대됨에 따라 다양한 지반조건에 대응하는 구조-지반 상호작용 특성을 고려할 필요성이 증가되고 있다. 풍력 지지구조물의 고유진동수 및 지지력 평가에서 활용되는 지반과 기초의 상호작용모델은 Fig. 1과 같이 구분될 수 있으며, 지표면 이하 상호작용을 고려한

[†]Corresponding author:

Tel: +82-31-910-0093; E-mail: jeongsookim@kict.re.kr

Received March 5 2020; Revised April 27 2020;

Accepted April 28 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1 Pile-soil interaction models(adapted from Jang *et al.*, 2013)

base spring 및 distributed spring 모델이 일반적으로 사용되고 있다(Adhikari and Bhattacharya, 2012; Jang *et al.*, 2013; 2015; Kim *et al.*, 2016b; Darvishi-Alamouti *et al.*, 2017). 말뚝 관입부의 해석모델이 단순하면 지반-구조물 상호작용을 온전히 반영하기 어렵고, 정교해지면 지반의 여러 거동 특성을 반영할 수 있는 장점이 있지만 해석모델을 정의하기 위한 여러 입력 변수를 어떻게 합리적으로 평가할 수 있는가의 문제가 발생한다(KGS, 2014). 실내 및 현장 실험에 의한 입력 변수의 결정은 논외로 하더라도, 적어도 여러 해석 모델이 설계 단계에서 등가 또는 유사한 범위에서의 해석결과를 제공할 수 있어야 하는데 이에 대한 상세한 비교 연구가 부족한 상황이다. 해상풍력 기초의 지반-구조 상호작용에 대한 연구는 주로 지지력 및 구조물의 단면력 변화를 평가하는 연구가 다수이며(Zaaijer, 2002; Bush and Manuel, 2009; Jang *et al.*, 2013; 2014; Jung *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016b), 해상풍력 지지구조물의 기초 강성 산정에 대한 비교연구가 이뤄지기도 하였으나(Jang *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016a), 작용하중에 대한 지지력 및 동적 응답 변화에 대한 분석에 대한 것이며, 지반-구조 상호작용 해석모델 차이에 의한 고유 진동수의 면밀한 비교 분석은 이뤄지지 않았다. 설계과정 중 고유진동수에 대한 반복적인 평가가 이뤄진다는 점에서 해석모델에 적용되는 지반-구조 상호작용 모델 특성으로 인한 영향이 충분히 분석될 필요가 있다.

이러한 이유로 본 연구는 모노파일 기초를 대상으로 여러 지반-구조물 상호작용 강성 모델링 방법을 비교하고, 각 방법에 의한 고유진동수 평가 결과의 차이를 비교 평가하였다. 3차원 유한요소모델과 등가의 해석결과를 제시하기 위한 base spring 및 distributed spring의 입력변수 산정 과정을 제시하였으며, 지반조건, 모노파일 기하조건 변화에 따른 각 모델의 고유진동수를 비교 분석하였다.

2. 풍력 구조물의 고유 진동수 해석 모델

2.1 지반-구조물 상호작용 모델

본 연구는 지반-구조물 상호작용을 고려한 해상 풍력 모노

Fig. 2 Mode shape(8 penetrated elements)

파일의 고유 진동수를 평가에 Fig. 2에 나타난 base spring 모델 및 distributed spring 모델과 함께 3차원 유한요소 해석모델을 이용하였다.

Base spring 모델은 해저면 이하로 관입된 모노파일의 영향을 강성행렬로 고려한다. 해석모델 하단에 이 강성행렬을 추가함으로써 지반-구조물 상호작용 구현한다. 관입부에 대한 유한요소모델을 통해 얻은 하중-변위 선도를 이용해 강성행렬의 성분을 추정하는데, 경우에 따라 강성행렬이 비대칭성을 갖기도(Jang *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2019) 한다. 비대칭 행렬은 복소수 형태의 고유값을 가질 수 있어 고유 진동수 평가에 어려움을 야기하기도 한다.

Distributed spring 모델은 해저면 이하로 관입된 구조물도 해석모델에 직접적으로 구현하고, 지반의 영향은 모노파일의 횡 및 축 방향에 대한 스프링을 추가함으로써 고려된다. 본 연구는 Beam-Spring(BS) 모델을 개선한 Winkler-Based Beam(WBB) 요소를 이용해 모노파일 및 인접 지반의 상호작용을 고려하였다(Kim *et al.*, 2002; 2015; Limkatanyu *et al.*, 2013). BS 모델과 WBB 모델에 대한 선형 변형에너지 관계에서 확인할 수 있듯이(식 (1)과 식 (2)), BS 모델은 보와 스프링이 개별적으로 정식화가 수행된 후 조합된다. 이는 연속적인 지반과의 상호작용을 절점으로 집중시키는 한계를 야기한다(Limkatanyu *et al.*, 2013). 반면, WBB 요소는 정식화 과정에서 연속적인 지반의 지지력 및 강성을 고려가 가능하며 하중-변위 선도 정의에 필요한 입력변수(지반반력계수)가 요소 길이에 무관하게 정의되므로 해석 모델의 편의성이 높다.

$$\delta U = \delta v k_s v \Big|_T + \int_x \delta v E I v'''' dx \quad (1)$$

$$\delta U = \int_x \delta v (E I v'''' + g_s v) dx \quad (2)$$

여기서 δ 는 변분량, U 는 변형에너지, v 는 보 구조물 횡 변위,

k_s 는 지반스프링계수, ET 는 보 구조물의 휨 강도(rigidity), x 는 보 구조물 길이, T 는 보 구조물 경계, g_s 는 지반반력계수이다.

3차원 유한요소모델은 모노파일 및 지반영역 전체를 고체 및 쉘 요소 등으로 재현하여 고유 진동수를 평가한다. 다양한 지층 구성 및 형상 고려가 가능하나, 전산해석 비용이 가장 많이 요구되므로, 위의 두 방법에 비해 설계모델로써 잘 활용되지 않는다.

2.2 해상풍력 구조물의 고유 진동수 해석

일반적으로 지반은 구조물에 비해 비교적 큰 감쇠효과를 가지므로, 동적 거동 분석 시 이 영향을 고유진동수 평가에 고려하는 것이 필요하다. 지반감쇠는 지반 강성과 질량(연경도 및 종류)에 모두 의존적으로, 복합적으로 고유진동수에 영향을 미친다. 그러나 일반적으로 풍력 구조물의 감쇠 영향이 작다고 평가되며(Kim *et al.*, 2016b; Kurabayashi and Cho, 2016), 하부구조물을 포함한 설계 단계에서도 비감쇠 자유진동을 가정하여 고유 진동수 검토가 수행된다. 본 연구는 지반-구조물 상호작용 강성 모델 차이로 인한 풍력구조물의 고유주파수 영향을 분석하는 것에 목적이 있으므로, 식 (3)과 같은 특성방정식을 이용해 비감쇠 자유진동해석을 수행하였다.

$$\mathbf{K}\phi_n = \omega_n^2 \mathbf{M}\phi_n \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{K}$ 는 경계조건이 고려된 전체 시스템 강성행렬, ϕ 는 모드벡터, ω 는 고유진동수, $\mathbf{M}$ 은 경계조건이 고려된 전체 시스템 질량 행렬, 하첨자 n 은 모드 차수이다. 본 연구에서는 각 지반-구조 상호작용 모델에 대한 고유치 해석을 위해 ABAQUS ver.6.14(Abaqus, 2013)를 이용하여 6자유도 강성행렬 및 3차원 유한요소모델을 생성하였다.

또한 연속 지반강성행렬을 적용한 2차원 프레임 요소(WBB) 모델을 Python 언어를 이용해 해석 프로그램으로 구현하였다(Smith and Griffiths, 2004). WBB 모델에서 요구되는 지반물성은 지반반력계수이며, 이 값은 지반 탄성계수와 등가가 되어야 한다. 지반 수평 지지력 및 주면 마찰력을 재현할 수 있도록 각각에 대한 지반반력계수를 식 (4)와 식 (5)에 의해 평가하였다.

$$k_l = \alpha E_s / (2r_0) \quad (4)$$

$$k_f = \frac{G_s}{r_0 \ln(R/r_0)} \quad (5)$$

Table 1 1st natural frequency of BS and WBB models

Model	The number of penetrated elements				
	1	2	4	8	16
f_n (Hz)					
BS	7.83	7.51	7.38	7.34	7.34
WBB	7.34	7.34	7.34	7.34	7.34

여기서 k 는 초기 지반 반력계수(하첨자 l : 횡 방향, f : 주면 마찰 방향), E_s 는 지반 탄성계수, r_0 는 말뚝 반경, α 는 보정계수, G_s 는 지반 전단 탄성계수, R 은 말뚝 인접 지반의 유효 전단 변형 반경으로 $R = 2.5L(1 - \nu_s)$ 이며, L 은 말뚝 길이, ν_s 는 지반의 포아송 비이다(Kim *et al.*, 2006; 2018).

2.3 WBB 해석 모델 검증

WBB 해석모델의 검증을 위해 2차원 BS모델 이용해 고유진동수를 비교하였다. 검증 모델을 생성하기 위해 ABAQUS ver.6.14를 사용하였다. 해석대상은 직경 1m 및 두께 3cm의 모노파일로 총 길이는 12m로 하부 2m가 지반에 관입되었다고 가정하였다. 말뚝은 SM355 강재 물성($E=200\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\rho=7,850\text{kg/m}^3$)를 적용하였고, 지반은 연암으로 가정하여 초기 변형계수(E_g), 포아송 비(ν_g)를 각각 1GPa, 0.25로 설정하였다. BS 및 WBB 모델의 경우, 연암 물성을 고려해 횡 방향 지반반력계수 $1,300\text{MN/m}^3$ 을 적용하였으나, 지반에 대한 질량은 고려되지 않는다. BS모델에서 지반반력계수는 최종적으로 스프링 상수로 적용되며 요소 길이 및 폭을 고려해 입력되었으며, WBB 및 BS 모델의 하단이 축 방향에 대해서만 구속되도록 경계조건을 부여하였다. 강성 및 질량 행렬의 계산을 위해 완전 수치 적분(fully numerical integration scheme)이 적용되었다.

Table 1은 BS 및 WBB 모델의 사용 요소 개수 증가에 따른 1차 고유주파수 변화를 보여준다. BS 및 WBB 모델에서 지반에 관입되지 않은 부분의 요소 개수는 10개로 고정되었다. WBB는 연속 지반강성이 적용되므로 BS에 비해 적은 요소 개수만 사용해도 빠르게 수렴되었으며, 요소 개수가 증가됨에 따라 두 해석결과가 일치하였다. 또한 Fig. 2에 나타난 바와 같이 모드 형상을 비교하였다. 위의 과정을 통해 WBB 모델이 BS 모델과 동일한 또는 개선된 고유주파수 해석결과를 제공할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 모노파일-지반 상호작용을 고려한 고유진동수 해석 모델 비교

지반-구조물 상호작용 해석모델 차이에 따른 고유진동수 변화를 비교하기 위해 지지구조물 기초를 1) base spring, 2) distributed spring, 3) 3차원 유한요소 모델로 각각 모델링하였

Table 2 Major parameters of comparative study with pile-soil interaction models for offshore wind monopile

Part	Parameter	Value
Ground	Density(kg/m ³)	1,000
		1,500
		2,500
	Initial deformation modulus(MPa)	20
		2,000
		20,000
	Poisson's ratio	0.25
Pile	Density(kg/m ³)	7,850
	Diameter, D (m)	1
		2
		5
	Thickness(cm)	3
	Elastic modulus(MPa)	200,000
	Poisson's ratio	0.3
	Penetration depth(m)	$4D$

Table 3 Mass and Inertia properties of RNA

Parameter	Value
Mass(kg)	391,421
Mass inertia(kg·m ² , about tower top)	40,300,020

다. 모노파일과 지반의 상호작용에 영향을 미칠 수 있는 인자는 여러 가지이나 사용 요소, 지반 강성 및 밀도, 모노파일 기하 조건으로 한정하여 고유주파수 변화를 비교하였다(Table 2). 제시된 지반 조건은 모래질 실트(N_{60} : 10~15), 연암 및 정암(일축압축강도: 각각 80MPa, 1200MPa 수준)을 가정하였다. 해석 모델별 매개변수별 비교를 위해 Table 3에 제시된 5MW급의 풍력 터빈에 대한 Rotor-Nacelle Assembly(RNA) 제원을 집중 질량모델에 적용하여 모노파일의 상단에 위치시켰다. 해저면 위로 노출된 모노파일의 길이는 110m이며, 관입깊이는 직경의 4배로 가정하였다.

3.1 해석 모델

본 연구는 6자유도 강성행렬(base spring)을 산정하기 위해

Fig. 3 FE model for base spring calculation

Fig. 3에 나타난 별도의 3차원 유한요소모델을 이용하였다. 3차원 해석모델에서 모노파일과 지반영역은 각각 셀 및 고체 요소를 이용해 묘사하였다. 지반 영역은 가로, 세로, 깊이 방향에 대해 모노파일 직경의 10배, 모노파일의 관입깊이는 직경의 4배로 설정하였다. 관입 말뚝 두부에 참조점(reference point)을 설정하고, 이 점이 모노파일 두부의 윤변(perimeter) 절점들과 coupling 되도록 하였다. 말뚝과 주변 지반과의 경계조건은 tie 조건을 부여하여 일체 거동하도록 하였다. 6자유도 강성행렬을 얻기 위해 해저면에서 말뚝 두부에 6개 자유도에 대한 단위 하중을 가해 말뚝 두부에 대한 유연도 행렬 및 역행렬(강성 행렬)을 구하였다. 선형 말뚝-지반 해석 모델을 이용해 base spring 강성을 추정하므로 본 연구의 6자유도 강성행렬은 대칭이 된다. Table 4는 모노파일 직경 및 초기 지반 변형계수 변화에 따른 6자유도 강성행렬의 성분을 나타낸 것이다. 여기서 6자유도 강성행렬 성분의 하첨자는 좌표계 방향을 의미하며, 1-3은 각각 전역 좌표계의 x, y, z 방향을 의미하고, 4-6은 전역 좌표계의 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 를 의미한다. 강재에 적용된 물성은 2.3절의 검증모델의 것과 동일하다. 최종적으로 관입부가 제외된 모노파일(길이 110m) 해석모델의 하단에 6자유도 강성행렬이 부착되고, 고유주파수 해석이 수행된다.

WBB 모델의 경우, 식 (4)와 식 (5)를 이용해 얻은 지반반력

Table 4 6x6 stiffness matrix components

Stiffness component	D=1.0m			D=2.0m			D=5.0m		
	Ground stiffness(MPa)			Ground stiffness(MPa)			Ground stiffness(MPa)		
	20	2,000	20,000	20	2,000	20,000	20	2,000	20,000
K_{11}, K_{22} (MN/m)	122.36	3,669.61	17,720.84	210.66	5,813.66	27,207.20	418.20	10,527.46	49,086.56
K_{33} (MN/m)	95.37	5,713.96	25,458.53	189.04	9,027.36	40,105.00	460.35	16,163.05	74,711.55
K_{44}, K_{55} (MNm/rad)	734.67	2,794.09	5,305.73	4,277.41	12,820.84	29,036.88	37,531.13	102,256.70	301,141.60
K_{66} (MNm/rad)	99.02	2,236.70	7,994.47	737.38	12,966.81	47,674.19	9,623.50	134,092.10	527,792.50
K_{42} (kNm/m)	230.91	1,327.95	893.62	695.06	2,789.48	462.66	2,640.37	6,336.06	-6,325.43
K_{51} (kNm/m)	-230.91	-1,327.95	-893.62	-695.06	-2,789.48	-462.66	-2,640.37	-6,336.06	6,325.43

Table 5 Soil subgrade modulus of WBB model

Parameter		Ground stiffness(MPa)		
		20	2,000	20,000
D=1.0m	k_i (GN/m ³)	26.0	2,600.0	260,000.0
	k_f (MN/m ³)	12.1	121.1	12,105.1
D=2.0m	k_i (GN/m ³)	13.0	1,300.0	130,000.0
	k_f (MN/m ³)	6.1	60.5	6,052.6
D=5.0m	k_i (GN/m ³)	5.2	520.0	5,200.0
	k_f (MN/m ³)	2.4	242.1	2,421.0

Table 6 First natural frequency of for cantilever beam without soil stiffness(D=1m, t=3cm)

Flexural mode			Cantilever length(m)				
			5	10	20	50	100
f_n (Hz)	1	Frame	38.75	9.69	2.42	0.39	0.10
		Shell	37.25	9.76	2.47	0.40	0.10
	2	Frame	242.82	60.71	15.18	2.43	0.61
		Shell	178.99	56.02	15.12	2.48	0.62
	3	Frame	679.93	169.98	42.49	6.80	1.70
		Shell	398.88	140.61	40.85	6.89	1.74

계수를 사용하였고, 이를 Table 5에 나타내었다. 말뚝 선단에 서 발생하는 변형은 작다고 가정하여 말뚝 선단에 고정단 경계 조건을 적용하여 고유주파수 해석을 수행하였다. 해석에서 구조물의 질량은 고려되나, 6자유도 지반강성 모델과 마찬가지로 지반의 단위 밀도 영향은 배제된다.

고유주파수 해석에 사용된 3차원 모델의 상세는 6자유도 강성행렬 산정을 위한 해석모델과 동일하며, 모노파일의 길이만 해저면 위로 110m 확장하였다.

3.2 해석결과

3.2.1 해석요소 영향

해석모델에서 모노파일을 재현하기 위해 WBB 모델은 프레임 요소를 사용하는 반면 3차원 유한요소모델은 쉘 요소를 사용하므로, 각각의 모노파일-지반 상호작용 모델의 결과를

비교하기에 앞서 해석모델별 사용 요소가 고유주파수에 미치는 영향을 비교할 필요가 있다. 이를 위해 지반강성이 배제된 3차원 프레임 및 쉘 모델에 대한 휨 변형 모드형상에 대한 고유주파수를 추가적으로 비교하여 Table 6에 나타내었다. 해석대상은 직경 1m, 두께 3cm의 중공 단면을 가지는 캔틸레버 보이며, 구조물의 길이만 변화시켜가며 고유주파수 변화를 비교하였다. 해석결과는 직경 대비 보의 길이가 짧은 경우, 고차 모드일수록 고유주파수 차이는 더 크게 벌어지는 경향을 보여준다. 이는 쉘 요소 사용으로 구조물의 비틀림이나 막(membrane) 변형이 동반되었기 때문으로 판단된다. 그러나 1차 모드에 대해서 고유주파수 오차는 작은 편이었고, 구조물의 길이가 증가됨에 따라 구조물의 휨 변형이 다른 변형보다 지배적이 되므로 해석 요소 차이로 인한 고유주파수 차이는 크게 감소하였다.

3.2.2 지반 밀도 영향

6자유도 강성행렬 및 WBB 모델은 지반 밀도로 인한 고유주파수 변화를 확인할 수 없으므로, 3차원 해석모델에서만 지반 밀도를 달리하여 고유주파수 변화를 검토하였다. Table 7은 지반 강성 및 직경 변화에 따른 모노파일의 고유주파수를 정리한 것으로, 휨 변형에 대한 모드형상에 대한 값들만 오름차순으로 나타내었다.

지반강성이 커짐에 따라 지반 밀도가 고유주파수에 미치는 영향은 미미하였다. 반면, 지반강성이 작아지면 지반 밀도로 인한 고유주파수 변화가 관찰되었는데, 특히 지반이 연약할 때 말뚝 직경이 커지면 고차 모드에 대해 고유주파수 변화가 관찰되었다(D=5.0m). 그러나 직경이 작으면(D=1.0m, D=2.0m) 지반 밀도에 의한 영향은 저차 모드에서도 관찰되지 않았다. 위의 결과에서 지반 질량이 1차 고유주파수에 미치는 영향이 강성에 비해 미미하다는 점에 주목할 필요가 있다. 이를 통해 지반 강성만 고려할 수 있는 6자유도 지반강성 또는 WBB 해석 모델을 해상풍력 구조물의 공진 안정성 평가에 적용하여도 1차 고유주파수에 대해 3차원 지반-구조물 모델에 근접하는 결

Table 7 Comparison with natural frequencies of 3D full model due to soil density effect

Flexural mode			E=20MPa			E=2,000MPa			E=20,000MPa		
			Soil density(kg/m ³)			Soil density(kg/m ³)			Soil density(kg/m ³)		
			1,000	1,500	2,500	1,000	1,500	2,500	1,000	1,500	2,500
f_n (Hz)	D=1.0m	1	0.016	0.016	0.016	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
		2	0.191	0.191	0.191	0.200	0.200	0.200	0.201	0.201	0.201
		3	0.522	0.521	0.521	0.567	0.567	0.567	0.571	0.571	0.571
	D=2.0m	1	0.043	0.043	0.043	0.047	0.047	0.047	0.048	0.048	0.048
		2	0.465	0.465	0.465	0.500	0.500	0.500	0.505	0.505	0.505
		3	1.127	1.132	1.133	1.237	1.237	1.237	1.253	1.253	1.253
	D=5.0m	1	0.150	0.150	0.150	0.174	0.174	0.174	0.179	0.179	0.179
		2	0.903	0.739	0.573	1.514	1.514	1.514	1.551	1.551	1.551
		3	1.306	1.215	0.945	3.678	3.679	3.679	3.752	3.752	3.752

과를 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 이 모델들을 이용한 해상풍력시스템의 공진 안정성 평가가 타당한 결과를 제공할 수 있음을 보여준다.

3.2.3 말뚝-지반 해석모델 영향

말뚝-지반 해석모델로 인한 고유주파수 영향을 분석하였다. 앞서 확인한 바와 같이 고차모드의 고유주파수는 지반의 밀도에 크게 의존적일 수 있으므로, 지반 밀도를 고려할 수 없는 6자유도 강성행렬 및 WBB모델의 결과와 비교하는 것은 적절하지 않다고 판단된다. 따라서 지반 밀도 영향이 미미한 1차 고유주파수를 비교하였다(Figs. 4~6).

6자유도 강성행렬은 3차원 모델과 등가 강성이 적용되기는 하나 질량이 반영되지 못하고, WBB모델은 지반반력계수 평가식에 의존적으로 지반 변형계수의 영향이 반영되므로 3차

원 모델과 완전 등가 강성이 적용된다고 판단하기는 어려움이 있다. 그럼에도 해석결과는 직경이 작고 지반강성이 커질수록 각 모델이 예측한 고유주파수의 값이 잘 일치하게 되며, 각 해석모델이 전반적으로 동일조건에 대해 유사한 예측결과를 제공할 수 있음을 보여준다.

그러나 해석결과는 연약한 지반에 관입된 대구경 모노파일을 프레임 및 스프링을 이용한 지반-구조물 상호작용 모델(BS 및 WBB 모델)을 사용했을 때, 1차 고유주파수를 보다 크게 평가할 수 있음을 보여준다. 모노파일 직경 1m 및 2m에 대해 각 모델의 해석결과는 비교적 일치하였으나, 직경 5m에 대해서는 불일치가 큰 편이다. 기존문헌들(Bae *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2019)에서 제시된 5MW급 풍력터빈의 설계 허용 주파수 범위를 고려했을 때, 1차 고유주파수에 대한 오차는 0.01Hz 내외로 존재할 필요가 있다. 연약 지반에 설치된 대구경 말뚝에 대해, BS 및 WBB 모델에 의한 고유주파수 오차는 이 범위를 초과하고 있다. 추가적으로, WBB 모델은 지반반력계수 평가식에 따라 예측된 고유주파수의 변동이 크므로 연약지반에 설치된 대구경 모노파일의 공진 안전성 평가에 적절하지 않을 수 있다.

4. 풍력 구조물 기초의 지반-구조물 강성모델 고찰

전체 해상풍력시스템 설계에서 고유진동수 평가가 반복적으로 수행되고, 터빈 및 타워의 국제 인증 등으로 인해 사실상 설계변경은 지지구조물 및 기초에서 이뤄질 수밖에 없다. 이러한 점에서 적절한 지반-구조물 상호작용의 평가가 더욱 중요하며, 적절한 해석모델을 사용하여 거동 특성 및 영향을 명확히 파악하는 것이 필요하다. 본 연구는 해상풍력 모노파일 구조물의 지반-구조물 상호작용 구현을 위한 몇 가지 해석모델들을 이용해 여러 직경 및 지반강성 등을 매개변수로 하여 고유주파수 변화를 비교하였고, 이 과정에서 추가적으로 논의가 필요한 몇 가지 사항에 대해 아래와 같이 기술하였다.

본 연구에서 도출된 지반강성 행렬은 대칭적이고, 음수인 강성 성분이 존재 한다(Table 4). 지반강성이 작을수록 6자유도 지반 강성행렬의 대각성분에 비해 비대각성분의 크기가 커졌고, 직경이 증가할수록 비대각성분의 크기가 상대적으로 작아지는 경향을 보였다. 이는 지반이 견고하고 소형 기초 구조물일수록 6자유도 강성행렬의 비대각성분의 영향이 미미하며, 해석 및 평가 편의상 제외하여 해석될 수 있음을 의미한다. 한편, 직경 증가에 비례하여 비대각 강성성분이 반드시 증가하는 것은 아니었다. 모노파일 주변 지반 격자망을 보다 조밀히 하고 다양한 직경 및 지반강성에 대한 추가 검토가 필요할 수 있는 부분이나, 1) 6자유도 강성행렬의 고유주파수 결과가 3차원 해석모델과 잘 일치하고 있고, 2) 고유주파수의 차이가

Fig. 4 Effects on frequency due to pile-soil model ($D=1.0\text{m}$, $\rho_g=2500\text{kg/m}^3$)

Fig. 5 Effects on frequency due to pile-soil model ($D=2.0\text{m}$, $\rho_g=2500\text{kg/m}^3$)

Fig. 6 Effects on frequency due to pile-soil model ($D=5.0\text{m}$, $\rho_g=2500\text{kg/m}^3$)

4차 이상의 고차 휨 모드에서나 미미하게 관찰되므로 본 연구의 해석결과 및 분석은 타당성을 가진다고 판단된다.

한편, 6자유도 강성행렬 평가방법에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 본 연구의 3차원 유한요소모델에서 지반-말뚝의 6자유도 강성행렬은 모두 대칭적이며 양수와 음수를 갖는 비대각 성분으로 구성되어 있다. 6자유도 강성행렬을 적용한 관련 기존 연구는 비대칭적 6자유도 강성행렬을 해석에 적용(Jang *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2019)하거나 대각성분만 고려된 지반강성행렬을 사용(Lee *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2017)하였다. 전자는 강성행렬 산정을 위해 지반-말뚝 상호작용 모델에 대한 비선형 해석으로부터 도출된 하중-변위 선도의 기울기를 이용했기 때문에 비대칭적 강성행렬을 적용하였으나, 초기 선형 구간에 대해 강성을 도출한 것이므로 비대칭적 강성행렬이 아닌 대칭적 강성행렬이 되었어야 한다고 판단된다. 참고로 Smith와 Griffiths(2004)에서 유한요소 정식화를 통해 제시된 WBB 요소의 강성행렬은 대칭적이며 비대각 성분이 모두 양수는 아니었고, Jang 등(2014)과 Jung 등(2014)의 연구에서 도출된 강성행렬 또한 위와 같은 사실을 지지하고 있다. 부가적으로 행렬의 비대칭성이 커질수록 복소수 형태의 고유값이 도출되므로(Ford, 2014), 고유치 해석의 안정성 개선을 위해서라도 강성행렬의 대칭성을 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서 제시된 방법을 활용하는 경우 항상 semi-positive definiteness를 확보할 수 있어 안정적으로 지반-말뚝 강성행렬을 구해낼 수 있다. 대각성분만 고려한 후자의 방법은 고유주파수 해석의 안정성은 높일 수 있지만, 고유주파수 오차를 수반한다. 다만, 본 연구의 결과에서 나타난 바와 같이 해상기초의 크기가 작고 지반이 양호한 조건이라면 비대각성분의 영향이 미미해지므로, 대각성분만 고려한 방법은 실무적으로 효과적인 방법이 될 수 있다.

Distributed spring 모델은 base spring 모델과 달리 지반-말뚝 강성 평가를 위한 추가적인 해석이 요구되지 않는다는 점에서 장점이 있다. 그러나 관련 문헌(KGS, 2014; Jung *et al.*, 2014; Byrne *et al.*, 2017)에서도 극한지지력 평가에 대해 p-y선도를 이용한 distributed model의 한계를 지적한 바 있다. 또한 본 연구의 WBB 모델의 해석결과를 통해 나타난 바와 같이 모노파일 길이에 비해 직경이 크고 지반이 연약할수록 공진 안정성 평가에 대한 WBB 모델과 3차원 유한요소모델의 결과는 무시할 수 없는 차이를 보이므로, distributed model은 대상 구조물 및 지반 특성을 고려해 신중히 적용할 필요가 있다. 특히, 지반의 초기 변형계수에 상응하는 등가의 지반반력계수의 평가방법이 명확히 정립되어야 할 필요가 있다. 평가된 고유주파수가 지반반력계수에 따라 크게 변동되므로, 해석 정확도 문제에 대해 자유롭지 않기 때문이다. 본 연구에서 제시된 지반 강성 및 모노파일 직경에 대해 식 (4)와 식 (5)가 다른 해석모델의

결과에 근접하는 등가 지반반력계수를 제공하였으나, 이외의 지반강성 및 직경에 대해서도 유효하지 않을 수 있다. 1) 앞서 언급한 distributed spring 모델의 한계점과 2) 지반-말뚝, 지지 구조물, 그리고 터빈을 포함한 상부구조물 설계가 통합적으로 이뤄지지 않는다는 점을 고려할 때, 전체적으로 더 많은 전산해석 비용이 요구되는 6자유도 강성행렬을 이용한 접근법이 해석 신뢰도 및 유용성 측면에서 더 유리할 수 있다 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 모노파일 형식의 해상풍력시스템에 대한 공진 안정성 평가에 적용되는 지반-구조 상호작용 해석모델이 고유주파수에 미치는 영향을 비교 평가하였다. 모노파일의 기하조건과 인접지반의 강성 및 질량 등을 변화시키며 base spring 및 distributed spring 모델로부터 고유주파수 및 모드형상에 대해 분석하였으며, 이를 3차원 유한요소모델 결과와 비교함으로써 해석모델이 갖는 한계 및 적용범위를 제시하였다. 연약지반 및 암반에 설치된 여러 규모의 해상풍력 모노파일 구조물에 대한 고유주파수 해석을 수행함으로써 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 구조물의 단면 크기 대비 길이가 증가할수록 셀 요소와 프레임 요소를 이용한 고유주파수 해석결과 차이는 미미해진다. 본 연구의 경우, 직경 대비 길이 비가 20 이상이면 요소에 의한 1차 고유주파수 차이는 0.01Hz 이하로 발생하였다.
- 2) 고유주파수 평가를 위한 모노파일-지반 상호작용 모델에 대해 지반 밀도의 영향은 고차 모드에서만 유의미하게 나타나므로, 1차 고유주파수를 사용하는 공진 안전성 평가에 base spring 및 distributed spring 모델에 의한 해석결과를 사용할 수 있다.
- 3) 지반 강성 및 구조물의 크기에 따라, 공진 안정성 평가모델을 적절히 선택하는 것이 필요하다. 지반강성이 높고 직경이 작을수록 지반-구조물 상호작용 모델의 유연한 선택이 가능함을 확인할 수 있었다. 반면, 지반이 연약하고 직경이 증가할수록 distributed spring 모델의 고유주파수 정확도는 감소할 수 있으므로, 지반특성 및 구조물 규모를 고려해 지반-말뚝 상호작용 모델을 선정하는 것이 필요하다. 본 연구의 경우 직경 1~5m 규모 말뚝기초가 암반 수준의 강성을 확보하지 못하면 distributed spring 모델의 결과는 3차원 모델에 비해 고유진동수를 최대 16.7% 과대평가하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 “초대구경 한국지형 모노파일 해상풍력기초 설치시스템 기술 개발(과제번호: 20183010025540)”과 “노후 풍력발전단지의 가용성 향상을 위한 리파워링 전주기 기술 개발(과제번호: 20183010025110)”과제의 지원을 받았습니다. 연구비지원에 감사드립니다.

References

- ABAQUS (2013) *ABAQUS user's and Theory Manuals, ver. 6.13*. Rhode Island: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Adhikari, S., Bhattacharya, S. (2012) Dynamic Analysis of Wind Turbine Towers on Flexible Foundations, *Shock & Vib.*, 19, pp.37~56.
- Bae, K.T., Kim, Y.S., Jin, B.M., Lee, J.P., Kim, J.Y. (2016) A Case Study on Concrete Foundation Design for offshore Wind Power, *KSCE 2016 Convention*, pp.178~179.
- Bush, E., 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.
- Byrne, B.W., McAdam, R.A., Burd, H.J., Houlby, G.T., Martin, C.M., Beuckelaers, W.J.A.P., Zdravković, L., Taborda, D.M.G., Potts, D.M., Jardine, R.J., Ushev, E., Liu, T., Abadias, D., Gavin, K., Igoe, D., Doherty, P., Skov, Gretlund, J., Pacheco Andrade, M., Muir Wood, A., Schroeder, F.C., Turner, S., Plummer, M.A.L. (2017) PISA: New Design Methods for Offshore Wind Turbine Monopiles, *Revue Française de Géotechnique*, 158(3), pp.142~161.
- Darvishi-Alamouti, S., Bahaari, M.R., Moradi, M. (2017) Natural Frequency of Offshore Wind Turbines on Rigid and Flexible monopiles in Cohesionless Soils with Linear Stiffness Distribution, *Appl. Ocean Res.*, 68, pp.91~102.
- Ford, W. (2014) *Numerical Linear Algebra with Applications: Using Matlab*, Academic Press, 1st Edition, pp.379~438.
- Jang, H.S., Kim, H.S., Kwak, Y.M., Park, J.H. (2013) Analysis of Lateral Behavior of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation in Sandy Soil, *J. Korean Soc. Steel Constr.*, 25(4), pp.421~430.
- Jang, H.S., Nam, H.W., Kwak, Y.M., Yoon, S.W., Kim, H.S. (2015) The Influence of Suction Foundation Model for Offshore Wind Turbine, *J. Korean Soc. Coast. & Ocean Eng.*, 27(5), pp.339~344.
- Jang, Y., Cho, S., Choi, C. (2014) Design Load Analysis for Offshore Monopile with Various Estimation Methods of Ground Stiffness, *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 15(9), pp.21~31.
- Jung, S., Kim, S.R., Lee, J., Lee, C.H. (2014) Effect of Foundation Flexibility of Offshore Wind Turbine on Force and Movement at Monopile Head, *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 13(4), pp.21~31.
- Kim, B.J., Plodpradit, P., Suthasupradit, S., Kim, H.G., Kim, K.D. (2017) Ship Collision Analysis of Concrete Offshore Wind Turbine Structure Supported with Suction Pile, *J. Wind Energy*, 8(2), pp.45~56.
- Kim, N.H., Bang, U.S., Lee, K.J. (2006) A Study on Lateral Movement of Drilled Shaft Considering Stratification, *Yooshin Technical Bulletin*, 13, pp.154~163.
- Kim, D.H., Park, J.J., Chang, Y.C., Jeong, S.S. (2018) Proposed Shear Load-transfer Curves for Prebored and Precast Steel Piles, *J. Korean Geotechnical Soc.*, 34(12), pp.43~58.
- Kim, J., Jeong, Y.J., Park, M.S., Song, S. (2019) Effect of Soil Stiffness Estimation on Natural Frequency of Monopiles, *KSCE 2019 Convention*, pp.218~219.
- Kim, J., Kim, M.K., Jung, S.D. (2015) Two-Dimensional Numerical Tunnel Model using a Winkler based Beam Element and Its Application into Tunnel Monitoring Systems, *Clust. Comput.*, 18(4), pp.707~719.
- Kim, P.H., Kang, S.Y., Lee, Y.W., Kang, Y.J. (2016a) Study on the Natural Frequency of Wind Turbine Tower Based on Soil Pile Interaction to Evaluate Resonant Avoidance Frequency, *J. Korea Acad.-Ind. Cooperation Soc.*, 17(4), pp.734~742.
- Kim, M.Y., Yun, H.T., Kwak, T.Y. (2002) Derivation of Exact Dynamic Stiffness Matrix of a Beam-Column Element on Elastic Foundation, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 15(3), pp.463~469.
- Kim, W.S., Jeong, Y., Kim, K., Kim, K.J., Lee, J.H. (2016b) Seismic Analysis for Multi-pile Concrete Foundation in 5MW class Offshore Wind Turbine, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(3), pp.209~218.
- Korean Geotechnical Society(KGS) (2014) *Design of Offshore Wind Turbine Foundation for Geotechnical Engineers*, CIR, pp.238~254.
- Kurabayashi, H., Cho, S.K. (2016) *Vibration Control Device*, KR Patent, No.1016584900000.
- Limkatanyu, S., Kuntiyawichai, K., Spacone, E., Kwon, M. (2013) Nonlinear Winkler-Based Beam Element with Improved Displacement Shape Functions, *KSCE J. Civil Eng.*, 17(4), pp.192~201.

Lee, D.I., Park, S.Y., Cho, Y.W., Kim, H.S. (2016) Development of Concrete Supporting Structure Design Using Suction Foundation in Offshore Wind Farms, *Yooshin Technical Report*, 23, pp.45~56.

Smith, I.M., Griffiths, D.V. (2004) *Programming the Finite Element Method*, 4th, John Wiley & Sons, Chichester, England, pp.25~29.

Zaaijer, M. (2002) Foundation Models for the Dynamic Response of Offshore Wind Turbines, *Marine Renewable Energy Conference*, Newcastle, UK.

요 지

본 논문은 모노파일 풍력 지지구조물에 대한 공진 안전성 평가에서 여러 말뚝-구조물 상호작용(PSI) 모델을 사용하여 고유진동수를 비교하였다. PSI 재현을 위한 유한요소모델은 기저 스프링 모델, 분산 스프링 모델, 3차원 고체-셸 모델을 사용하였다. PSI 모델이 고유주파수에 미치는 영향을 분석하기 위해 기저 스프링과 분산 스프링 모델 적용을 위한 강성행렬 산정법과 Winkler 보 모델을 각각 논문에 나타내고 이들 모델로부터 도출된 서로 다른 기하 및 지반조건을 갖는 모노파일의 고유진동수를 조사하였다. 해석 결과는 또한 3차원 고체-셸 모델의 고유진동수와도 비교되었다. 해석결과는 소구경 모노파일이 견고한 지반 및 암반에 관입된 경우 각 해석모델로부터 얻어진 고유진동수의 차이가 거의 없음을 보여준다. 반면 연약 지반에 설치된 대구경 모노파일에 대해 분산 스프링 모델은 고유진동수를 과대평가할 수 있다. 따라서 고유진동수 평가 시 구조물 규모와 지반 조건을 고려해 적합한 PSI모델이 적용되어야 한다.

핵심용어 : 말뚝-지반 상호작용, 풍력 모노파일 기초, 고유진동수, 공진 안전성 검토