

지반과 말뚝의 상호작용을 고려한 고정식 해상풍력터빈의 동적 특성에 대한 확률적 평가

이진학^{1,2*} · 김선빈¹ · 한택희^{1,2} · 윤길림^{1,2}

¹한국해양과학기술원 연안공학연구본부
²한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과

Probabilistic Assessment of Dynamic Properties of Offshore Wind Turbines Considering Soil-Pile Interaction

Jin-Hak Yi^{1,2*}, Sun-Bin Kim¹, Taek Hee Han^{1,2} and Gil-Lim Yoon^{1,2}

¹Coastal and Environmental Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, 426-744, Korea

²Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 606-791, Korea

Abstract

Extensive discussion on the optimal types of offshore wind turbine(OWT) among monopile, tripod and jacket in the intermediate depth of water has been actively carried out in worldwide wind turbine industry. Selecting the optimal types of OWT among several substructural types, it is required to consider the economic and technical feasibility including dynamically stable design of a wind turbine system. In this study, the effects of loading levels and uncertainties of soil properties on the natural frequency of OWT have been quantitatively investigated. In conclusion, the natural frequency of monopile-type OWTs has a significant level of uncertainty, hence it is very important to minimize the level of uncertainties in soil properties when the monopile is selected as a foundation for an OWT.

Keywords : soil-pile interaction, natural frequency, offshore wind turbine, monopile, tripod, jacket

1. 서론

천해역에 시공되는 해상풍력터빈(offshore wind turbine, OWT)의 경우 모노파일 기초가 가장 널리 사용되고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 수심이 상대적으로 깊은 25~30m이상의 조건에서는 재킷 또는 트라이포드 기초 역시 경쟁력이 있는 해상풍력 기초 형식으로 고려되고 있다(EWEA 2013, Fig. 1참조). 최근에는 모노파일의 현장적용이 어려울 것으로 예상되었던 수심 30~50m 조건에서도 모노파일의 직경을 대폭 증가시킨 말뚝 직경 7m이상의 XL 또는 XXL 모노파일 등이 개발되면서 모노파일과 재킷 등 여러 방식 간의 경쟁이 심해질 것으로 예상되고 있다. 잘 알려져 있듯이 재킷 기초는 이미 석유시추용 플랫폼 구조물의 하부구

조로도 널리 적용되고 있는 형식이며, 특히 우리나라 서남해안의 경우에 연약층 심도가 깊고 또한 국내에서 재킷 설계, 제작 및 시공 경험이 많아 국내 해상풍력 기초로 재킷이 채택될 가능성이 높은 상황이다. 예를 들어 제주 월정리 해역에 설치되어 운영 중인 2기의 OWT 및 최근 착공된 탐라해상풍력단지의 OWT의 경우에도 재킷을 지지구조물로 사용하고 있다.

한편, 모노파일, 트라이포드 또는 재킷과 같은 기초형식을 해상풍력 기초로 적용하기 위해서는 지반-말뚝 상호작용, 지반 물성치의 불확실성 등 반드시 해결해야 하는 기술적 과제가 존재하고 있다. 이 논문에서는 지반 물성치의 불확실성을 고려하여 이러한 고정식 기초로 지지된 OWT의 동적 특성, 특히 고유주파수를 분석하였다. 고유주파수는 블레이드 회전

* Corresponding author:

Tel: +82-31-400-7811; E-mail: yjih@kiost.ac.kr

Received June 8 2015; Revised July 6 2015;

Accepted July 16 2015

©2015 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.

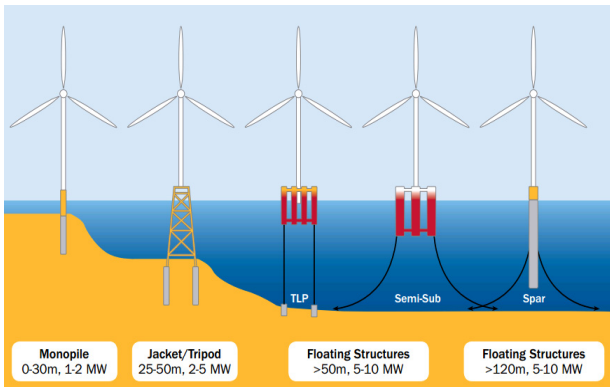


Fig. 1 Offshore wind foundations(EWEA, 2013)

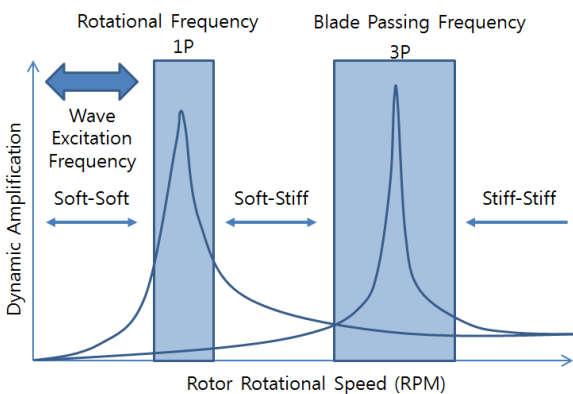


Fig. 2 Basic design concept of wind turbines for avoiding dynamic instability due to resonance

에 따른 공진을 회피하기 위하여 설계 시 반드시 검토해야 하는 중요한 내용이다.

일반적으로 OWT의 하부구조 설계 시 구조물의 고유주파수가 로터(rotor)의 회전주파수(rotational frequency, 1P) 범위와 블레이드가 타워를 통과하는 주파수(blade passing frequency, 3P) 범위를 회피할 수 있도록 설계된다(DNV and RISO, 2002). 그러므로 Fig. 2와 같이 (1) soft-soft, (2) soft-stiff, (3) stiff-stiff 중 하나로 설계하게 된다. 이 가운데 고정식 기초를 갖는 OWT(bottom-fixed OWT)의 경우에는 주로 1P 주파수와 3P 주파수 사이에 풍력터빈의 고유주파수가 위치하도록 하는 soft-stiff 설계가 가장 일반적이다.

그러나 OWT의 경우에는 육상풍력터빈과는 달리 이러한 동적특성을 설계에 반영하기 위하여 기초 지반의 영향을 고려하여야 하고, 말뚝과 지반 상호작용 해석 시 지반물성치에 포함되어 있는 불확실성을 함께 고려하는 것이 중요하다. 지반-말뚝 상호작용은 가상고정점 모델(apparent fixity model), 복합 모델 및 Winkler 스프링 탄성모델 등을 이용하여 분석할 수 있다. 이 논문에서는 $p-y$, $t-z$, $q-z$ 등의 지반 스프링을 이용하는 Winkler 탄성 모델을 적용하여 지반과 말뚝의 상호작용을 고려하였다(Barber, 1953; Davisson and Gill,

1963; Hetenyi, 1946; Matlock and Reese, 1960; Winkler, 1867).

2. 지반-말뚝 상호작용 모델

말뚝 기초는 재킷식 해상 플랫폼에 있어 상부에서 발생하는 하중을 하부 지반으로 전달하는 기능이 가장 중요한 구조부재라 할 수 있다. OWT에 유발되는 바람, 파랑 및 지진 등의 외력으로 인하여 지지구조물인 말뚝과 지반의 상호작용이 발생되는데 전체 OWT의 거동을 이해하는데 있어 가장 핵심적인 내용으로 알려져 있다. 일반적으로 말뚝은 실제 지반의 관입 깊이까지 보요소를 이용하여 모델링할 수 있으며, 지반의 강성은 관입 깊이까지 모델링한 말뚝의 절점에 비선형 지반 스프링을 추가하여 표현할 수 있다. 이 논문에서는 말뚝은 탄성계수와 단위중량이 각각 210GPa, 7.85kN/m³인 강관으로 설계하였고, 말뚝 주변의 지반은 $p-y$, $t-z$, $q-z$ 관계로 나타나는 Winkler의 비선형 지반 스프링으로 모델링하여 해석하였다. 이 때 횡하중과 말뚝의 변위관계인 $p-y$ 곡선은 점토층과 사질토층에 대하여 API(2005)의 제안식과 Evans와 Duncan(1992)의 제안식을 각각 적용하였고, 연직하중과 말뚝의 변위관계인 $t-z$, $q-z$ 는 다음과 같이 API(2005)에 제시된 식을 적용하였다.

- $p-y$ 곡선

$$\frac{p}{p_u} = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{1/3} \text{ where } y_{50} = 2.5 \cdot \epsilon_{50} \cdot D \quad (1)$$

$$\text{사질토 : } p_u = \min(p_{us}, p_{ud}) \quad (2a)$$

$$\frac{p}{p_u} = A \cdot \tanh \frac{y}{y_c} \text{ where } y_c = \frac{A}{k_1} \frac{p_u}{z} \quad (2b)$$

$$\text{점토 : } p_u = s \cdot c_u \cdot D + \sigma'_z \cdot D + J \cdot c_u \cdot z \quad (3a)$$

$$p_u = 9 \cdot c_u \cdot D \quad (z \geq X_R) \quad (3b)$$

여기서, p : 수평변위 y 발생 시 수평저항력

p_u : 극한수평저항력

y : 심도 z 위치에서의 수평변위

D : 말뚝 직경

ϵ_{50} : 최대압축응력 50% 수준에서의 변형률

- $t-z$ 곡선

$$\frac{f}{f_{\max}} = \frac{w}{w_{\max}} \quad (w \leq w_{\max}) \quad (4a)$$

$$f = f_{\max} \quad (w > w_{\max}) \text{ where } w_{\max} = 2.54mm \quad (4b)$$

$$\text{사질토 : } f_{\max} = K \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_z \leq f_{\text{limit}} \quad (5)$$

$$\text{점토 : } f_{\max} = \alpha \cdot c_u \quad (6a)$$

$$\alpha = 0.5 \psi^{-0.5} \leq 1, \psi \leq 1 \quad (6b)$$

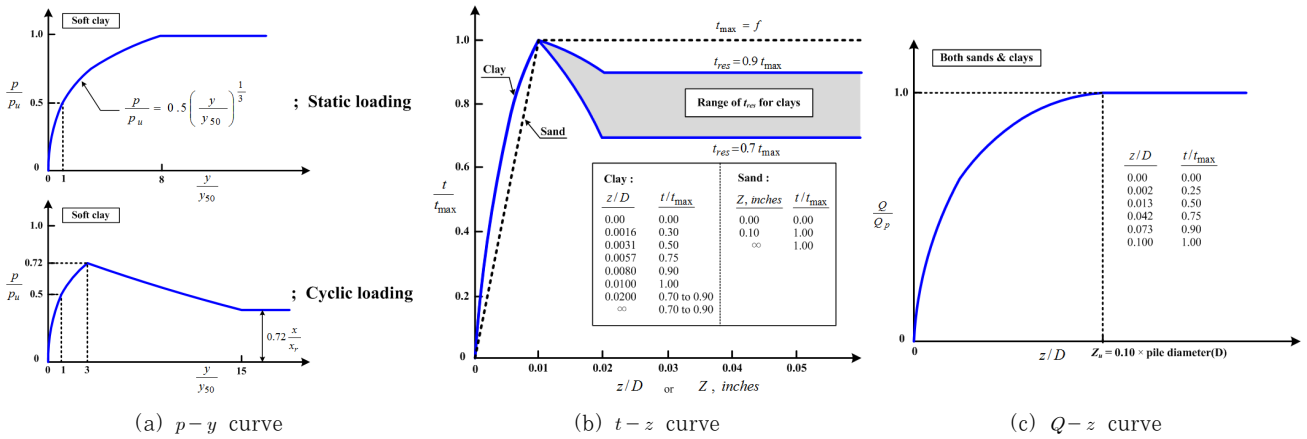


Fig. 3 Typical soil-pile springs

$$\alpha = 0.5 \psi^{-0.25} \leq 1, \psi > 1 \quad (6c)$$

$$\psi = c_u / \sigma'_z \quad (6d)$$

여기서, f : 연직변위 w 발생 시 주면마찰저항력
 w : 심도 z 위치에서의 연직변위
 f_{max} : 최대주면마찰저항력
 K : 수평토압계수
 δ : 지반-말뚝주면 마찰각
 σ'_z : 심도 z 위치에서의 유효상재하중
 f_{limit} : 한계주면마찰저항력
 c_u : 심도 z 위치에서의 비배수전단강도

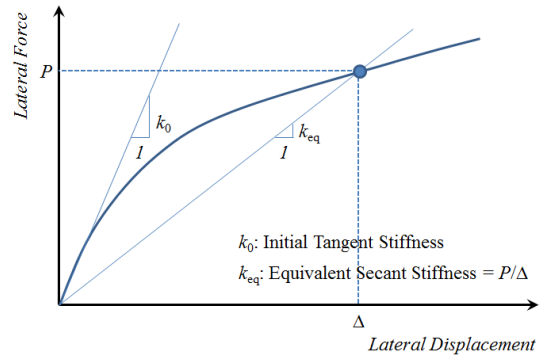


Fig. 4 Equivalent secant stiffness of nonlinear soil spring

- $q-z$ 곡선

$$\frac{q}{q_{max}} = \left(\frac{z_b}{z_{max}} \right)^{1/3} \quad (z_b \leq z_{max}) \quad (7a)$$

$$q \leq q_{max} \quad (z_b > z_{max}) \quad (7b)$$

$$\text{사질토 : } q_{max} = N_q \cdot \sigma'_z \leq q_{limit} \quad (8)$$

$$\text{점토 : } q_{max} = 9 \cdot c_u \quad (9)$$

여기서, q_{max} : 최대선단저항력
 N_q : 선단지지력 factor
 σ'_z : 말뚝선단 위치에서의 유효상재하중
 q_{lim} : 한계단위선단지지력
 z_b : 말뚝선단 연직변위
 z_{max} : q_{max} 에서의 말뚝선단 연직변위

전술한 바와 같이 지반-말뚝 상호작용은 비선형 특성을 가지고 있고, 따라서 선형 모드해석을 위해서는 증가의 선형화 과정이 필요하다. 물론 비선형 시간이력해석을 수행할 수 있으나, 이 경우 계산시간이 많이 소요되기 때문에 불확실성을 고려한 신뢰도 해석 등에서는 선형화된 강성을 이용하는 선형 모

드해석이 상대적으로 효율성이 높다고 할 수 있다. 이러한 선형 모드해석을 통하여 구한 고유주파수를 1P 및 3P 주파수 범위와 비교하여 공진을 회피할 수 있도록 설계할 수 있다.

현재까지 국제적으로 비선형 지반 스프링에 대한 일반화된 선형화 과정은 제시되지 않은 상태이며, 일반적인 구조물의 비선형 관계식의 선형화 과정에서는 할선계수(secant stiffness), 또는 접선계수(tangential stiffness)를 이용하여 선형화할 수 있다 (Fig. 4 참조). 예를 들어 풍력터빈의 연성해석(coupled analysis)을 위하여 가장 많이 사용되고 있는 설계프로그램인 GH_Bladed의 경우, 모드해석에서는 초기접선계수, 즉 초기강성을 이용하여 모드해석을 수행하고 있다(GH, 2003). 한편, 지반이 하중 재하에 따라 비선형 탄성거동을 한다면 접선계수를 이용할 수 있으나, 비탄성거동을 하는 경우에 대하여 접선계수를 사용하면 강성을 과소평가하므로 고유주파수가 매우 작게 평가될 수 있다.

이 연구에서는 평균풍속을 중심으로 변동풍속을 포함하는 난류모델로 풍속 조건을 고려하여, 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 TurbSim 프로그램을 이용하여 Kaimal 스펙트럼을 만족하는 공간상의

풍속 시계열을 생성하였다(Jonkman and Kilcher, 2012). 이 풍속 시계열을 이용하여 역시 NREL에서 개발한 공력-서보-탄성 연성해석 프로그램인 FAST 프로그램(Jonkman and Buhl, 2005)을 이용하여 추력을 산정하고, 추력의 변동성분의 RMS 값을 이용하여 이를 등가하중 크기로 고려하였다. 이때 평균값을 고려하지 않고 변동성분만을 고려한 이유는 보통 지반의 동적 거동특성은 비선형 탄성거동보다는 비선형 소성거동을 보이기 때문이다. 즉 하중이 제하(unloading)될 경우에 접선강성을 갖지 않고 초기강성(initial stiffness)을 가지기 때문에 추력의 변동성분을 이용하는 방식으로 등가하중의 크기를 결정하였다.

3. 수치해석

3.1 해석모델 제한

풍력터빈의 타워와 RNA(rotor nacelle assembly) 등은 NREL 5MW 풍력터빈(Jonkman *et al.*, 2009)의 제원을 이용하였다. 지반 조건은 2.5GW 해상풍력단지 개발과 관련하여 서남해 해상에서 최근 수행한 바 있는 콘관입시험(cone penetration test, CPT) 결과를 이용하여 산정된 값을 해석에 이용하였다(KOPEC, 2013). 한편 모노파일, 트라이포드, 재킷 등의 기초 구조물 제원은 서남해안 2.5GW 실증사업을 위하여 제시된 조건을 만족하도록 설계된 결과를 이용하였다. 상세 제원은 Fig. 5 및 Table 1에서 제시된 값과 같다. 그리고 수치해석의 단순화를 위하여 블레이드와 허브의 질량은 모두 허브의 질량중심에 그리고 나셀은 나셀의 질량중심에 집중질량으로 모델링하였다. 해수의 영향은 부가질량(added mass)으로 계산하여 해당 절점에 질량을 추가하여 고려하였다. 한편 플랫폼의 높이를 보면, 모노파일, 트라이포드, 재킷 등의 지지구조물에 따라 그 높이가 각각 15.4m, 16.0m, 25.5m로 재킷의 플랫폼 높이, 즉 TP 높이가 가장 높다. 한편 지반으로 관입되는 말뚝의 제원을 보면 직경과 두께가 모노파일 5.7m, 70mm, 트라이포드 2.5m, 40mm, 재킷 1.45m, 40mm로 모노파일을 제외하면 트라이포드와 재킷의 경우는 일반적인 시공장비로도 충분히 시공이 가능함을 알 수 있다. 한편 말뚝 관입깊이는 모노파일의 경우만 해저면에서 30m까지 관입하고, 트라이포드와 재킷은 40m까지 관입하는 것으로 설계하였다. 재킷의 경우, 플랫폼의 높이가 높아 타워 자체의 길이가 짧아지게 되고, 이로 인하여 어느 정도 고유주파수가 증가할 수 있다. 그러나 이 연구의 목적이 하부구조물을 설계하는 측면보다는 지반의 불확실성을 고려할 때 구조물의 고유주파수 변동을 정량적으로 평가하는 것이므로 이와 같은 사항에 대해서는 다루지 않았다.

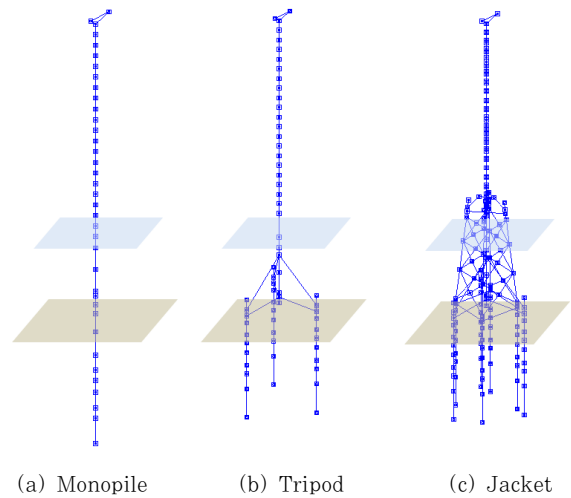


Fig. 5 Wind turbine model with jacket(not scaled)

Table 1 Specification of OWT model

(a) Tower

Hub height	90m
TP height	20m
Tower thickness(top/bottom)	20mm
Tower diameter(top/bottom)	3.87m/ 6m
Top mass(blades+hub+nacelle)	251.2ton
Density	7,850kg/m ³

(b) Substructures

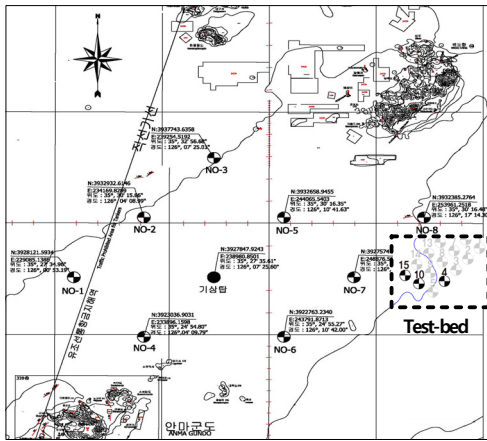
	Monopile	Tripod	Jacket
TP height	15.4m	16.0m	25.5m
Pile diameter	5.7m	2.5m	1.45m
Pile thickness	70mm	40mm	40mm
Penetration Depth	30m	40m	40m

3.2 지반물성치의 불확실성

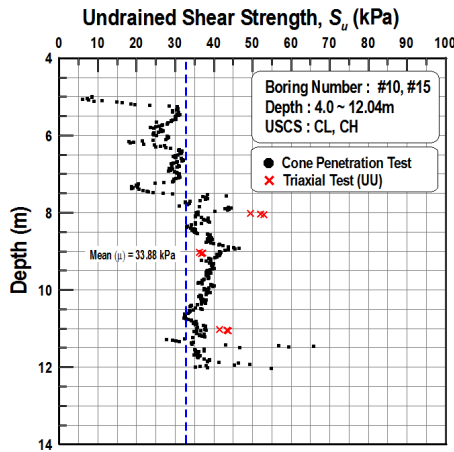
대상해역에서 실시한 콘관입시험과 비교란 시료를 채취하여 실내에서 수행한 일축 삼축압축시험 결과 등을 토대로 산정한 심도별 지층의 통계적 지반물성치를 Fig. 5와 Table 2에서 정리하였다. 현재까지 공개되어 있는 대상해역의 지반조사 자료를 바탕으로 구한 변동계수(coefficient of variation, COV) 값을 보면 단위중량(γ)에 대해서는 10%, 점착력과 비배수전단강도(c , S_u)는 22.5%, 내부마찰각(ϕ)에 대해서는 6.3% 수준으로, 일반적인 지반물성치의 변동성 범위를 고려 시 c 와 S_u 의 변동성은 비교적 낮은 수준이고, ϕ 의 불확실성은

Table 2 Characteristic values for soil layers at the target site

Soil layers		Depth (m)	Unit weight (kN/m ³)	Cohesive Stress (kPa)	Angle of internal friction(°)
Silt	CH	0-5.0	17.0	20.00	-
	CL	5.0-12.3	18.0	33.54	-
Sand	SM	12.3-23.0	19.0	16.63	31.59
Silt	CL	23.0-30.0	18.0	60.00	-



(a) Target site for offshore wind farm



(b) CPT data for BH-7

Fig. 6 Target site and CPT data for offshore wind farm in Korea

평균 수준으로 평가되었다(KOPEC, 2013; Yoon *et al.*, 2014).

3.3 수치해석 결과

Fig. 7은 정격풍속에 가까운 풍속 12.0m/s에서 지반의 영향을 고려하지 않고 난류모델만 NTM-A, B, C를 고려하여 FAST를 이용하여 구한 추력결과이다. 주어진 풍속조건에서 추력의 통계적 특성값은 바람의 난류성분에 상관없이 거의 일정한 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. FAST의 경우 현재까지 지반조건을 고려한 해석이 되지 않기 때문에 이 연구에서는 지반 조건에 따른 추력은 고려하지 않고, 모두 고정된 경계조건을 갖는 것으로 가정하고 해석을 수행하였다. 한편 추력의 변동폭은 지반의 비선형 강성을 결정하는데 있어 중요한데, 여기서는 전술한 바와 같이 RMS 값을 이용하여 추력의 변동폭을 증가하중 크기로 고려하였다. 다음 Fig. 7의 결과에서 구한 RMS값은 77kN 수준임을 알 수 있다. 즉, 정격풍속에서의 선형 모드해석을 위한 증가하중

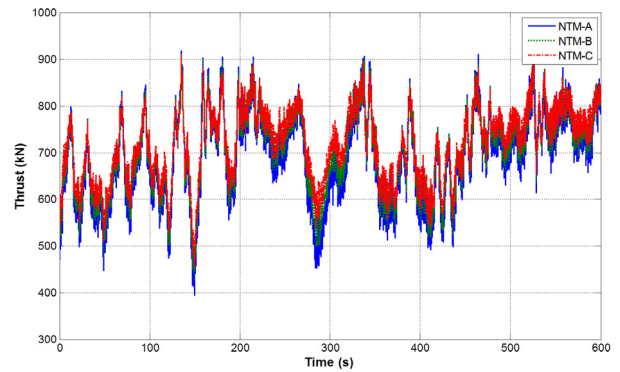


Fig. 7 Thrust force time history data under rated wind speed

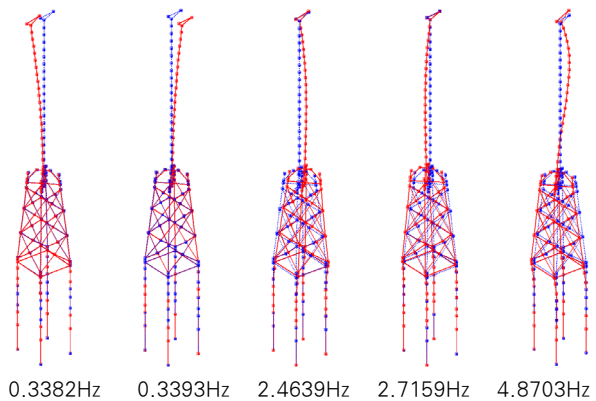


Fig. 8 Lower 5 modes for the 5 MW example wind turbine model

수준이 77kN임을 의미한다. 한편 정격풍속과 같은 상황에서는 추력이 파력에 비하여 상대적으로 지배적임을 고려하여 파력은 고려하지 않았다.

Fig. 8은 정격풍속 조건에서 구한 선형화된 지반 스프링을 도입한 경우 채킷식 OWT의 모드형상과 고유주파수를 정리한 것이다. 첫 번째와 두 번째 모드는 전후(fore-aft), 좌우(side-side) 방향으로의 첫 번째 굽힘 모드이고, 세 번째와 네 번째는 전후, 좌우 방향으로의 두 번째 굽힘 모드이다. 허브와 블레이드, 그리고 나셀의 질량을 각각의 질량 중심에 추가하였기 때문에 전후, 좌우 방향 모드의 고유주파수는 약간 차이가 발생함을 알 수 있다. 만약 RNA의 모든 질량을 타워 상부에 추가한다면 이러한 차이가 발생하지 않는다.

한편 각각의 하중 조건에서 정규분포(normal distribution)로 가정한 지반물성치의 평균과 분산계수를 고려하여 1,000개의 무작위 샘플을 추출하였고, 각각의 샘플에 대하여 고유주파수를 구한 후 그 결과를 Fig. 9에서 히스토그램으로 제시하였다. 모노파일의 경우 분산 정도가 매우 크고, 트라이포드와 채킷의 경우 분산 정도가 매우 작음을 알 수 있다. 특히 모노파일의 결과에서 가로축의 주파수 범위가 0.04Hz이고, 트라이포드와 채킷형의 경우 주파수 범위가

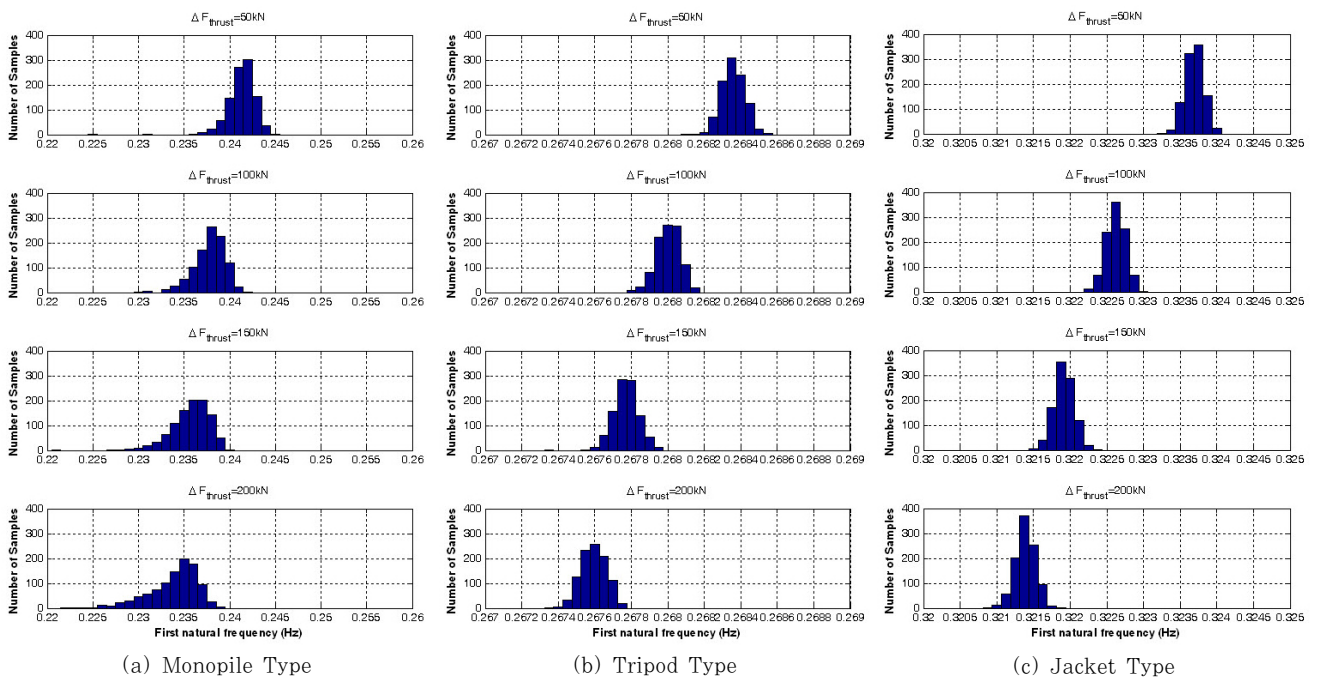


Fig. 9 Histogram of first natural frequencies from 1,000 samples

0.002Hz, 0.005Hz임을 고려할 때 모노파일식 OWT의 고유주파수 변동성이 상대적으로 매우 큼을 알 수 있다.

한편 등가하중이 가장 작게 들어간 경우와 가장 크게 고려한 경우, 즉 등가하중을 10kN과 210kN으로 고려한 경우의 고유주파수 값을 각각의 지지구조물을 해저면에서 고정시킨 것으로 고려하여 해석한 고유주파수와 비교하여 그 결과를 Fig. 10과 Table 3에서 제시하였다. 이때 트라이포드와 재킷은 힌지(hinged)와 고정(fixed)의 경우를 비교하였고, 모노파일은 고정(fixed)의 경우만 고려하였다. 모노파일의 경우, 해저면 위치에서 고정 지지조건을 부여하여 해석한 결과 첫 번째 고유주파수가 0.286Hz로 분석되었으며, 이때 지반의 영향을 고려함으로써 0.248Hz까지, 즉 13% 이상 고유주파수가 감소하는 결과를 얻을 수 있다. 한편, 트라이포드나 재킷형 OWT의 경우에는 고정지지조건에 비하여 지반을 고려하더라도 감소비율이 1.39%과 2.19%로 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 이는 곧 재킷식 OWT 또는 트라이포드식 OWT의 경우에는 지반의 영향을 고려한 해석 이전에 예비설계 등의 초기 단계에서는 해저면에서 구조물의 경계조건을 힌지로 고려하더라도 고유주파수 측면에서는 큰 영향이 없음을 의미한다. 한편, 하중 크기에 따른 영향을 살펴보면 모노파일식 OWT의 경우, 10kN을 재하하는 경우와 210kN을 재하하는 경우 5.8% 정도 고유주파수가 감소하지만, 트라이포드식 OWT와 재킷식 OWT의 경우에는 0.5%와 1.3% 감소하는 정도로 등가하중의 영향도 매우 작음을 알 수 있다. 한편 힌지조건과 고정조건 사이에서는 재킷식 OWT가

Table 3 Natural frequencies for various conditions

Case		Monopile	Tripod	Jacket
Fixed	$f_1(a)$ (Hz)	0.2864	0.2728	0.3329
	$f_1(b)$ (Hz)	-	0.271	0.3322
Hinged	1-(a)/(b) (%)	-	0.66%	0.21%
	$f_1(c)$ (Hz)	0.2480	0.2690	0.3256
P=10kN	1-(c)/(a) (%)	13.41%	1.39%	2.19%
	$f_1(d)$ (Hz)	0.2336	0.2676	0.3213
P=210kN	1-(d)/(c) (%)	5.81%	0.52%	1.32%

0.21%의 차이를 가지고 있어 트라이포드식 OWT 보다 상대적으로 그 차이가 작음을 알 수 있다. 그러나 재킷식과 트라이포드식 OWT의 경우 힌지조건과 고정조건, 그리고 지반-말뚝 상호작용을 고려한 조건 모두 큰 차이는 없는 것으로 판단할 수 있다.

한편 Fig. 10에서는 추가적으로 일정한 등가하중에서의 지반 물성치 불확실성에 의한 고유주파수의 변동을 표준편차를 고려하여 함께 정리하였다. 평균값만을 보면 모노파일식 OWT의 경우 0.2480Hz에서부터 0.2336Hz까지 5.8% 수준까지 점차 감소하였으며, 트라이포드식 OWT와 재킷식 OWT의 경우에는 0.5%, 1.3% 정도의 감소율로 거의 동일한 수준으로 분석되었다. 따라서 모노파일식 OWT의 경우 하중에 따른 영향이 약 5% 남짓한 수준으로 공학적으로 볼 때 큰 수치는 아니지만 상대적으로 트라이포드식 또는 재킷식 OWT에 비해서는 하중의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 또한 표준편차를 함께 표시한 Fig. 10의 결과를 보면, 트라이포드식, 재킷식 OWT의 경우 $\pm 3\sigma$ 의 범위가 매우 작

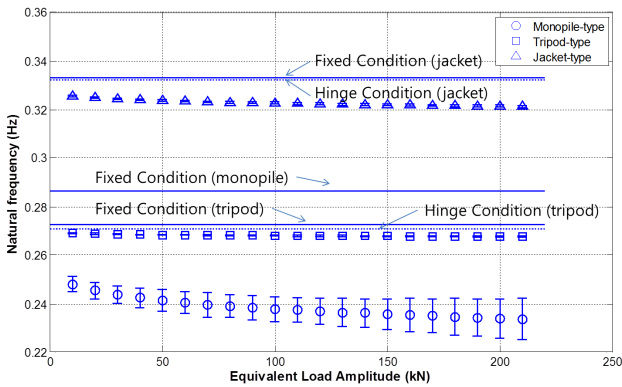


Fig. 10 μ and $\mu \pm 3\sigma$ of first natural frequencies with different equivalent load amplitudes

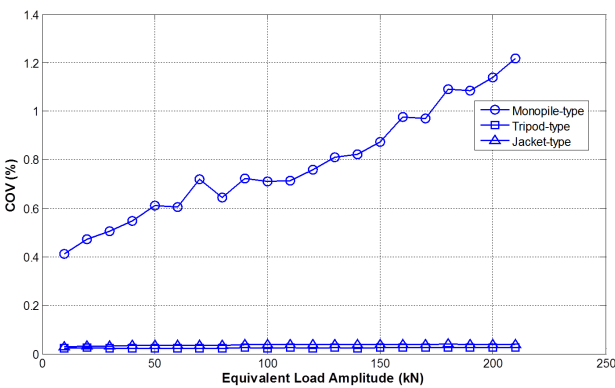


Fig. 11 Equivalent Load Amplitudes vs COV

아 뚜렷한 차이를 알기 어려우며, 모노파일식 OWT의 경우 분명한 범위를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 정규분포를 따르는 확률변수에 있어 $\pm 3\sigma$ 내에 99.72%의 확률이 존재하고, 이 범위를 벗어날 가능성은 0.28% 정도에 불과하기 때문에 트라이포드식과 재킷식의 경우는 거의 정확하게 예측이 가능함을 알 수 있다. 그러나 모노파일의 경우에는 일정한 범위까지 검토하여야 하고, 또한 Fig. 11에서 제시하고 있는 증가하중에 따른 COV값의 변화를 보면, 증가하중이 증가할수록 모노파일식 OWT의 고유주파수 COV가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 연구에서 포함하지 않은 증가하중이 210kN보다 큰 경우에는 더 큰 COV를 가질 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

이 논문에서는 지반과 말뚝의 상호작용을 고려하여 OWT의 고유주파수를 분석하고 지반의 불확실성을 고려하여 그 영향을 정량화하는 수치해석을 수행하였다. 연구결과, 증가하중 크기의 영향은 선형화된 지반 스프링의 강성으로 나타나며, 하중이 재킷이나 트라이포의 경우에는 명확하게 보이지

않지만 모노파일의 경우에는 증가하중이 증가할수록 고유주파수가 감소함을 알 수 있었다. 이는 증가하중이 증가할수록 선형화된 강성이 작아지기 때문이다.

그리고 일정한 증가하중에서의 지반 물성치의 불확실성에 의한 고유주파수의 변동을 분석한 결과, 트라이포드식과 재킷식 OWT의 경우 COV값이 매우 작아 고유주파수의 범위가 매우 좁고 따라서 정확한 예측이 가능하지만 모노파일식 OWT의 경우에는 증가하중이 210kN인 경우 1.2%가 되어 지반 물성치의 불확실성에 의한 영향이 상대적으로 크게 반영되는 것을 알 수 있었다.

따라서 어떤 형식의 해상풍력 기초를 선정하는가와 관련하여 경제성 측면에서의 평가도 매우 중요하지만 동적특성을 함께 고려한다면 더 합리적인 선정 기준을 마련할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 연구를 확장하여 모노파일식 OWT에 대한 지반물성치의 불확실성, 증가하중 크기의 영향 등을 살펴보고 그 특성이 재킷형 OWT과 어떻게 다른지 등을 분석할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부 및 한국에너지기술평가원에서 지원하고 있는 “해상풍력 신뢰성 해석 및 설계프로그램 개발 (20123030020110)” 연구과제의 성과이며 이에 감사드립니다.

References

API (2005) *Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*, American Petroleum Institute Publishing Service, Washington D.C., 1~263.

Barber, E.S. (1953) Discussion to Paper by S.M. Gleser, *ASTM, STP*, 154, pp.96~99.

Davissou, M.T., Gill, H.L. (1963) Laterally Loaded Piles in Layered Soil System, *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 89(3), pp.63~94.

Det Norske Veritas, RISO National Laboratory (2002) *Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Edition*.

Evans, L.T.Jr., Duncan, J.M. (1982) *Simplified Analysis of Laterally Loaded Piles*. Report UCB/GT/82-04, University of California, Berkeley.

EWEA (2013) *Deep water? The Next Step for Offshore Wind Energy*, European Wind Energy Association.

Garrad Hassan, Partners Limited (GH) (2003)

- GH Bladed Theory Manual*.
- Hetenyi, M.** (1946) *Beams on Elastic Foundations*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Jonkman, J.M., Buhl, M.L.** (2005) *FAST User's Guide*, Technical Report NREL/EL-500-38230.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G.** (2009) *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*, Technical Report NREL/TP-500-38060.
- Jonkman, B.J., Kilcher, L.** (2012) *TurbSim User's Guide: Version 1.06.00*, NREL Technical Report.
- KOPEC** (2013) *Test Bed for 2.5GW Offshore Wind Farm at Yellow Sea*, Interim Design Basis Report.
- Matlock, H.** (1970) Correlation for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay, *Proc., 2nd Ann. Offshore Technol. Conf., OTC*, Houston, Texas, pp.577~594.
- Winkler, E.** (1867) *Die Lehre von der Elastisitat und Festigkeit*, Dominicus, Prague, Czech Republic.
- Yoon, G.L., Kim, S.B., Kwon, O.S., Yoo, M.S.** (2014) Partial Safety Factor of Offshore Wind Turbine Pile Foundation in West-South Mainland Sea, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 34(5), pp.1489~1504.

요 지

천해역에서의 해상풍력터빈의 기초 형식으로 모노파일, 트라이포드, 재킷 등의 고정식 기초 사이의 최적의 지지구조물 선별에 대한 논의가 세계적으로 활발하게 되어왔다. 다양한 기초 형식 가운데 어떤 기초를 최종 선택하기 위해서는 경제성과 함께 동적설계 측면에서의 검토도 필요하다. 이 연구에서는 고정식 기초를 해상풍력터빈의 기초로 적용하는 경우 전체 구조물의 고유주파수에 미치는 하중 및 지반 물성치의 불확실성의 영향을 정량적으로 검토하였다. 연구결과, 모노파일의 고유주파수의 변동이 가장 심한 것을 알 수 있었고, 따라서 모노파일 기초를 설계에 반영하는 경우에는 지반 물성치의 불확실성을 최소화시키는 것이 중요하다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 지반-말뚝 상호작용, 고유주파수, 해상풍력터빈, 모노파일, 트라이포드, 재킷