

지진 안전도 해석을 위한 Twisted Tripod 지지 구조를 갖는 풍력발전기의 말뚝-지반 상호작용 모델 평가

박광연 · 박원석*

서울대학교 건설환경종합연구소 · *목포대학교 토목공학과
(2017. 12. 26. 접수 / 2018. 1. 27. 수정 / 2018. 2. 9. 채택)

Evaluation of Pile-Ground Interaction Models of Wind Turbine with Twisted Tripod Support Structure for Seismic Safety Analysis

Kwang-yeun Park · Wonsuk Park**

Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University

*Department of Civil Engineering, Mokpo National University

(Received December 26, 2017 / Revised January 27, 2018 / Accepted February 9, 2018)

Abstract : The seismic response, the natural frequencies and the mode shapes of an offshore wind turbine with twisted tripod substructure subject to various pile-ground interactions are discussed in this paper. The acceleration responses of the tower head by four historical earthquakes are presented as the seismic response, while the other loads are assumed as ambient loads. For the pile-ground interactions, the fixed, linear and nonlinear models are employed to simulate the interactions and the p - y , t - z and Q - z curves are utilized for the linear and nonlinear models. The curves are designed for stiff, medium and soft clays, and thus, the seven types of the pile-ground interactions are used to compare the seismic response, the acceleration of the tower head. The mode shapes are similar to each other for all types of pile-ground interactions. The natural frequencies, however, are almost same for the three clay types of the linear model, while the natural frequency of the fixed support model is quite different from that of the linear interaction model. The wind turbine with the fixed support model has the biggest magnitude of acceleration. In addition, the nonlinear model is more sensitive to the stiffness of clay than the linear pile-ground interaction model.

Key Words : twisted tripod, offshore wind turbine, pile-ground interaction, seismic response

1. 서론

해상풍력발전기의 하부구조 형식은 모노파일 형식, jacket, tripod 형식이 대표적이다. 모노파일은 설계, 제작, 시공이 간단하다^{1,2)}. 하지만 바람 효율을 높이고 설치지역을 확장하기 위해 해상풍력발전기를 수심이 깊은 바다에 설치하는 경우가 늘면서 30 m 이상의 수심에 유리한 것으로 알려진 jacket과 tripod 하부구조를 이용해 해상풍력발전기를 설계하는 경우가 늘고 있다^{3,5)}. 특히 twisted tripod 형식의 하부구조는 jacket과 일반 tripod 형태의 하부구조에 비해 구조가 간단해 조류, 파도, 바람의 영향이 적은 것으로 알려져 있다⁶⁾. 또한 같은 이유로 공장제작 단가가 낮고 시공 및 유지보수비

용이 저렴하다⁷⁾. 하지만 twisted tripod 하부구조는 최근에 제안되어 많은 연구가 이루어져 있지 않다⁸⁾.

기존에 쓰이던 풍력발전기 하부구조와 마찬가지로 twisted tripod 하부구조를 가진 풍력발전기 역시 지진에 대한 응답을 분석할 필요가 있다. 지진에 대한 수치 해석을 할 때는 지반-말뚝 상호작용을 어떻게 이상화할 것인가가 특히 중요하다. 지반-말뚝 상호작용은 지진이 구조물에 가하는 힘에 직접적인 영향을 주며 구조물의 강성에도 큰 영향을 주기 때문이다. 특히 해상 풍력발전기는 기타 대형 토목구조물과 다른 성격을 많이 가지고 있기 때문에 지진과 지반-말뚝 상호작용에 대한 수치해석과 실측실험이 필수적이다. 이 논문에서는 twisted tripod 하부구조를 가진 해상풍력발전기를

* Corresponding Author : Wonsuk Park, Tel : +82-61-450-2471, E-mail : wonsuk@mokpo.ac.kr
Department of Civil Engineering, Mokpo National University, 1666 Yeongsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan-gun, jeonnam, 58554, Korea

수치적으로 해석해 여러 종류의 지반 상태와 지반모형에 대한 고유진동수와 모드형상을 분석하고 역사지진 지반가속도가 가해질 때 타워헤드의 최대가속도가 어떻게 변화하는지 살펴보고 분석한다.

지반-말뚝 상호작용모형은 크게 분리형과 일체형모형으로 나눌 수 있으며, 분리형모형은 스프링지점형태로 지점을 근사하는 방법과 보에 달린 여러 스프링으로 이상화 하는 두 가지 방법이 있다^{9,10}. 일체형모형은 지반을 구조의 일부로 취급하여 유한요소로 모형화 하는 방법으로 직관적이고 현실에 가장 가깝지만 자유도가 크게 증가하여 해석에 소요되는 자원이 매우 크다. 스프링지점형태는 선형, 혹은 비선형 지반을 병진자유도를 구속하는 스프링 3개와 회전자유도를 구속하는 스프링 3개로 단순화하는 모형이다. 이 방법은 가장 단순한 모형이지만 비선형 지반-말뚝 상호작용을 6개의 비선형스프링으로 치환하는 과정이 복잡하고 지진-지반 상호작용을 반영하기 어렵다. 마지막 방법은 지반-말뚝 상호작용을 보 요소에 부착된 여러 개의 스프링으로 치환하는 방법으로 지진-지반 상호작용은 고려할 수 없으나 해석시간 대비 높은 정확도의 지반-말뚝 상호작용 구현이 가능하다. 이 논문은 지진-지반 관계를 명확히 하기보다 지진에 대한 응답을 살펴보고자 하므로 해석시간에 비해 현실반영률이 높은 말뚝과 여러 개의 스프링을 이용하는 모형을 선택했다.

이 논문은 말뚝과 여러 개의 스프링을 이용한 지점 모델에 총 3 가지 토질성질을 선형, 비선형으로 이상화해 적용하고¹¹ 고정단모형을 추가해 총 7가지 지반-말뚝 상호작용을 사용한다. 이중 선형모형과 고정단모형의 고유진동수와 모드를 분석했다. 말뚝 여러 개가 근접해 설치된 경우 무리말뚝 효과를 고려해야 하지만^{12,13} 말뚝간 간격이 넓기 때문에 무리말뚝 효과는 고려하지 않았다. 또한 총 4개의 역사지진¹⁴을 7가지 지반-말뚝모형에 가하며 타워헤드에 부착된 팬과 나셀이 경험하는 최대 절대 가속도 크기를 비교분석한다.

2. 수치모형

2.1 지반-말뚝 상호작용모형

말뚝과 지반 사이의 상호작용은 고정단모형, 선형스프링모형, 비선형스프링모형 등 세 가지 모형을 이용한다. 또한 선형스프링과 비선형스프링모형은 단단한 흙, 무른 흙, 중간정도로 단단한 흙 등 세 가지 종류의 토양강도를 사용했다.

지반-말뚝 상호작용모형 중 고정단모형은 토양특성을 반영하지 않은 것으로 병진 및 회전의 총 6개 자유도를 구속한 고정단으로 구현했다. 선형/비선형 스프링모형은 Fig. 1과 같이 3차원 보 요소와 그에 부착된 세 종류의 스프링으로 이상화 한다¹⁵. 말뚝에 부착된 세 종류의 스프링은 횡하중-변위, 연직마찰력-변위, 선단지지력-선단변위 세 가지 거동을 이상화 한 것이며 각각 Winkler의 비선형지반스프링모형인 $p-y$, $t-z$, $Q-z$ 관계를 이용해 모형화 했다^{11,16}. p , t , Q 는 각각 지반이 말뚝에 가하는 수평저항력, 수직마찰력, 선단지지력이며 y 와 Z 는 각각 말뚝의 수평변위 및 수직변위이다. American Petroleum Institute (API)는 Winkler의 $p-y$, $t-z$, $Q-z$ 관계를 각각 Fig. 2 (a), (b), (c)와 같이 정리했다¹¹. Fig. 2에서 관계식을 결정하는 계수인 p_u , y_c , D , t_{max} , Q_p 는 각각 극한수평저항력, 최대압축응력 50%수준의 말뚝수평변위, 말뚝직경, 최대수직마찰력, 최대선단지지력이다.

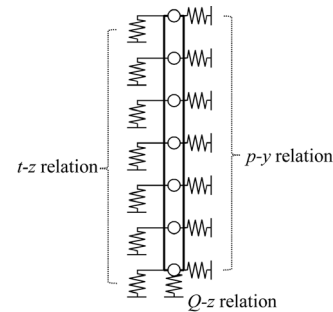


Fig. 1. Pile-soil relation with linear or non-linear springs.

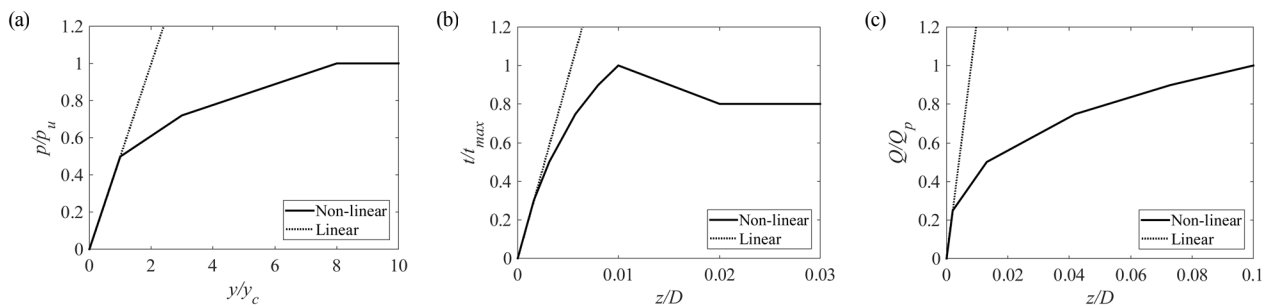


Fig. 2. Soil-pile interaction relation curves: (a) lateral load-deflection ($p-y$) curve, (b) axial loaded soil friction ($t-z$) curve and (c) pile tip load-displacement ($Q-z$) curve.

비선형스프링모형은 Fig. 2에 제시된 비선형관계를 그대로 이용해 구현한다. API는 $t-z$ 관계식 마지막 구간의 t/t_{max} 를 0.7~0.9로 제안하고 있는데, 여기선 중간값인 0.8로 가정했다. 비선형지반스프링의 선형화과정은 아직 명확히 정립되지 않았기 때문에 일반적인 선형화기법인 접선계수(tangential stiffness)나 할선계수(secant stiffness)를 이용해야 한다. 접선계수는 지반 강성을 너무 크게 평가하는 경향이 있기 때문에 Fig. 2와 같이 비선형관계의 첫 번째 구간 기울기를 탄성계수로 삼는 할선계수로 선형스프링모형을 구현했다¹⁰⁾. Fig. 2의 (a), (b), (c)는 각각 $p-y$, $t-z$, $Q-z$ 관계의 선형모형과 비선형모형간의 차이를 보여준다.

Winkler의 비선형모형을 사용하기 위해선 계수 p_u , y_c , t_{max} , Q_p 를 결정해야 한다. 이 계수들은 API가 제안한 값들을 사용했다¹¹⁾. p_u 는 다음식으로 결정한다.

$$\begin{cases} p_u = 3c + \gamma X + JcX/D & \text{when } X < X_R \\ p_u = 9c & \text{when } X \geq X_R \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $X_R = 6D/(\gamma D/c + J)$ 이며 c , X , γ , J , 는 각각 토양의 비배수 전단강도, 표면으로부터의 깊이, 토양의 유효단위중량, 경험적 무차원 계수이다. 이 논문에서 토양의 비배수 전단강도는 단단한 흙, 중간정도로 단단한 흙, 무른 흙에 대해 각각 82 kPa, 36 kPa, 18 kPa를 사용했다. 경험적 무차원계수인 J 는 0.25~0.5사이의 값을 갖는데 일반적인 지반에 대해 0.4가 적당한 것으로 알려져 있다. 토양의 유효단위중량은 18 kN/m³으로 하였다. y_c 는 다음 식으로 결정 한다¹¹⁾.

$$y_c = 2.5\epsilon_c D \quad (2)$$

여기서 ϵ_c 는 최대압축응력 50%수준에서 발생하는 말뚝수평변형도로 일반적인 흙에서 0.01을 사용한다. t_{max} 는 단단한 흙, 중간정도로 단단한 흙, 무른 흙에 대해 각각 81.3 kPa, 67.0 kPa, 47.8 kPa로 제시되어 있으며 Q_p 는 각각 4.8 MPa, 2.9 MPa, 1.9 MPa로 제시되어 있다.

2.2 구조모형 및 하중모형

풍력발전기 및 하부구조는 수심 50 m인 곳에 설치되어 있으며, 바람, 해류, 파도하중을 받는다.

Twisted tripod 하부구조를 가진 해상풍력발전기는 하부구조, 타워, 말뚝 모두 7800 kg/m³, 200 GPa의 질량밀도와 탄성계수를 가진 구조용강재로 이루어진 원형 강관으로 가정 하였으며 풍력발전기의 팬과 나셀은 집중질량으로 가정하였다. 하부구조는 Chen 등에 의해

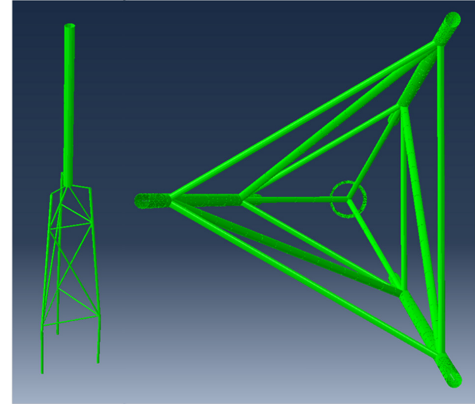


Fig. 3. Bird's-eye and bottom views of tripod substructure and tower.

Table 1. Specification of the tripod substructure

Element	Length(m)	Diameter(m)	Thickness(m)
Tower	65.00	6.00	0.05
Leg	66.86	1.80	0.04
Top brace	17.23	0.90	0.06
Middle brace	50.85	1.20	0.06
Top horizontal brace	11.07	0.90	0.03
Bottom horizontal brace	24.41	0.90	0.03
Pile	25.00	1.80	0.04

설계된 0° twisted tripod⁸⁾를 참고했으며 타워, 팬, 나셀은 Kawai 등에 의해 설계된 것¹⁷⁾을 사용했다. 관입말뚝은 이진학(Yi) 등이 제안한 말뚝의 규격과 관입깊이를 참고해 전체구조물 대비 말뚝 길이 및 직경, 두께 등의 비율이 비슷하도록 결정했다¹⁰⁾. Twisted tripod 하부구조와 타워, 말뚝 형상은 Fig. 3과 같으며 자세한 치수는 Table 1에 기록되어 있다. 팬과 나셀은 타워 최상단에 3500 kN의 집중질량으로 배치했다.

하중은 지진, 바람, 해류, 파도하중 등이 있다. 지진을 제외한 하중은 모두 사용상태의 일반하중으로 가정하였다. 지진과 동시에 극한바람, 파도, 해류하중이 가해질 가능성은 낮다고 판단하였기 때문이다. 바람, 파도, 해류하중은 Chen 등이 사용한 하중⁸⁾을 적용하였고, 지진하중은 김재관 등이 사용한 역사지진¹⁴⁾ 중 4개를 사용했다.

바람, 파도, 해류하중의 방향은 악조건을 고려하여 모두 동일한 방향으로 적용되는 것으로 가정했다. 방향 역시 악조건을 고려하여 지진이 가해질 때 가장 큰 절대가속도가 적용하는 방향과 같은 방향으로 재하 되도록 했다.

지진하중은 국내에서 발생한 2개 지진과 외국에서 발생한 2개 지진으로 하나의 강진을 포함하고 있다. 사용

한 지진의 지반가속도는 Denali, Alaska, 2002 / Mineral, Virginia, 2011 / 서격렬비도, 충남, 2014 / 울진해안, 경상북도, 2004에서 측정한 것이며 각각 규모 7.9/ 5.8/ 5.1/ 5.2이며 Peak Ground Acceleration은 각각 1.09/ 1.22/ 0.0867/ 0.0288 m/s²이다. 모든 지진은 동서, 남북, 상하 세 방향 지반가속도를 모두 적용하였으며 각각의 동서방향 가속도와 남북방향 가속도 중 더 큰 최대 절대가속도를 가진 방향의 가속도가 tripod 구조의 삼각형 중 한쪽면에 수직이 되도록 적용했다.

바람하중은 해수면과 타워헤드 사이에 적용했으며 Fig. 4에 표시한 것과 같이 타워헤드로부터 해수면까지 분포하중으로 작용한다.

$$f_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 C_D D \quad (3)$$

여기서 f_{wind} , ρ_{air} , U , C_D 는 각각 바람하중, 공기밀도, 풍속, 항력계수이다. 공기밀도는 1.293 kg/m³로 했고, 풍속은 국내해안의 풍속을 고려해 7 m/s로 결정했다. 항력계수는 원형 관에 대해 0.9를 사용한다. 타워와 나셀은 집중질량으로 치환되어 분포하중의 영향을 받지 않으므로 일반적인 팬 및 나셀의 규격을 고려하여 집중하중으로 가하였다. 이때 팬은 정지상태로 가정하였다. 팬에 가해지는 힘은 정면, 좌우, 상하 각각 389.48 kN, 1185 kN, 4112 kN이며 나셀엔 각각 51.77 kN, 102.26 kN, 4.05 kN이 정면, 좌우, 상하로 가해진다. 파도와 해류하중은 각각 200.384A kN/m, 8.008D kN/m로 가해진다. 여기서 A는 m² 단위로 입력하는 부재의 외경이 감싸는 단면적이며 D는 m단위로 입력한다. 파도하중은 해수면 기준으로 -29 m ~ 3 m 사이에 가해지며 해류하중은 해저면부터 해수면높이인 50 m 높이까지가해진다. 바람, 파도, 해류하중은 모두 최대지진지반 가속도가 더 큰 방향과 동일한 방향으로 적용했다.

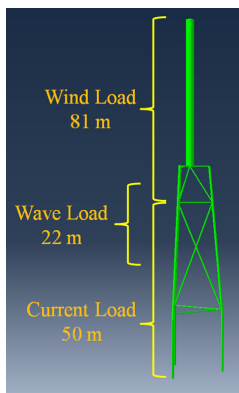


Fig. 4. Ranges of external forces.

3. 수치해석결과분석

동적수치해석은 ABAQUS를 이용했다. 3차원틀보 요소를 이용한 유한요소로 이산화 하였으며 ABAQUS의 요소 자동생성 기능을 이용해 요소 크기가 2 m내 외에서 결정되도록 했다. 동해석은 implicit dynamic으로 수행 하였다. 시간 간격은 주어진 지반가속도의 측정간격과 동일하게 0.005초로 설정 했으며 전체 해석 시간은 주어진 지반가속도의 측정시간과 일치시켜 90 초 전후의 해석시간을 적용했다. 동적모드는 고정단모형과 선형스프링모형 3개, 총 4개의 경우를 비교한다. 동적응답은 타워헤드의 최대 가속도 크기를 4개의 지진과 7개의 지반조건, 총 28개의 경우에 대해 비교분석한다.

3.1 동적모드 분석

고정단모형 및 세 종류 강도의 흙을 모사한 선형스프링모형에 대한 1차~5차 고유진동수와 고유모드가 각각 Table 2와 Fig. 5에 기록되어 있다. 구조물이 120도 회전대칭이기 때문에 횡방향지배 모드는 고유진동수와 고유모드가 두 개씩 짝지어 나타난다. 모드형상을 볼 때 고정단모형의 1, 2차 모드는 선형스프링모형의 1, 2차 모드에 대응된다. 하지만 3, 4, 5차 모드는 순서가 약간 바뀌어 고정단모형의 3차 모드가 선형스프링모형의 5차 모드와 비교되어야하고 고정단모형의 4, 5차 모드가 선형스프링모형의 3, 4차 모드에 대응된다.

이진화(Yi) 등에 의해 밝혀진 바와 같이 선형스프링모형의 고유진동수는 흙의 강도변화에 둔감하게 변화하는 경향을 보였다¹⁰⁾. 반면 고정단모형의 고유진동수와는 큰 차이를 보인다. 즉, 고정단모형을 사용할 때는 고유진동수가 타당한지에 대한 검토가 반드시 필요하다. 모드형상은 고정단과 선형스프링모형 모두 거의 비슷한 모습을 가지고 있다.

Table 2. Natural frequencies of the tower with tripod substructure

Mode	Natural frequency (Hz)			
	Fixed support model	Linear soil-pile interaction model		
		Stiff clay	Medium clay	Soft clay
1 st	0.5386	0.4396	0.4136	0.3380
2 nd	0.5386	0.4396	0.4136	0.3780
3 rd	2.3927	1.3167	1.1777	1.0589
4 th	2.6441	1.3168	1.1777	1.0589
5 th	2.6442	1.5476	1.3641	1.1892

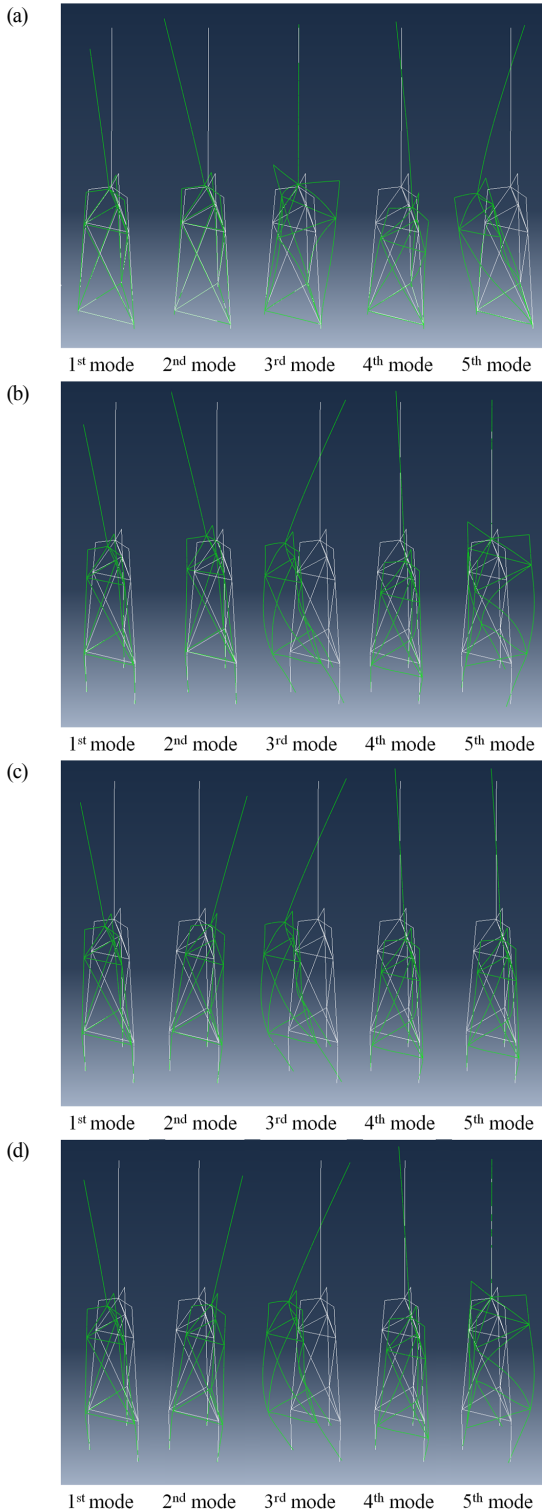


Fig. 5. Dynamic mode shapes: (a) fixed support, (b) stiff clay, (c) medium clay and (d) soft clay.

3.2 동적응답 분석

Fig. 6은 지점모형에 따라 변화하는 최대 절대 가속도를 비교하고 있다. 무른 흙의 경우 고정단의 응답이

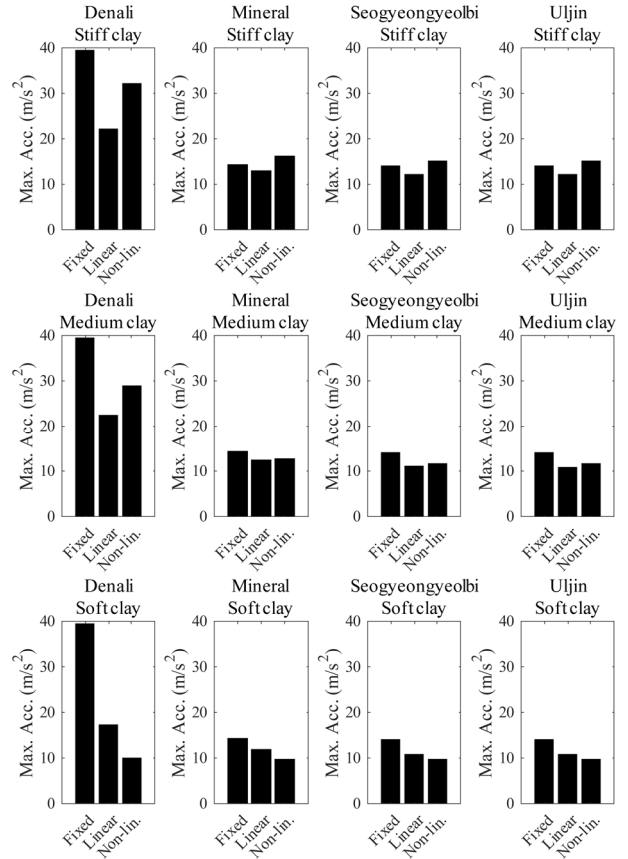


Fig. 6. Maximum magnitudes of accelerations at the tower head for different supports models.

가장 큰 것이 확연히 드러난다. 해상풍력발전기는 많은 질량이 구조물 가장 높은 곳에 집중되어있어 주요 모드의 거동이 타워헤드에 집중된다. 타워헤드는 지점에서 먼 곳에 위치하고 있기 때문에 지점모형의 변화에 따른 영향력이 비교적 적다. 이런 이유로 구조물의 동적 주요 모드들을 비교하면 지점의 모형에 관계없이 타워와 타워헤드의 모드형상이 거의 같을 것이며 이는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 하지만 지점의 강성이 커지면 지진지반의 움직임이 구조물에 가하는 힘이 커지기 때문에 동적응답이 커진다. 흙의 강도가 높아지면 고정단모형, 선형스프링모형, 비선형스프링모형의 강성 차이가 작아지며 그에 따라 최대 절대 가속도가 비슷해진다.

Fig. 7은 지반 상태에 따른 최대 절대 가속도의 변화를 비교한다. 알려진 바에 의하면 tripod 하부구조물을 가진 해상풍력발전기의 지점을 선형스프링모형으로 가정한 경우 구조물의 동적거동이 토양특성의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있으며 이는 Fig. 6의 위쪽그림들의 결과와 상통한다¹⁰⁾. 하지만 비선형모형은 토양특성에 따른 구조물의 동적응답, 최대 절대 가속도의

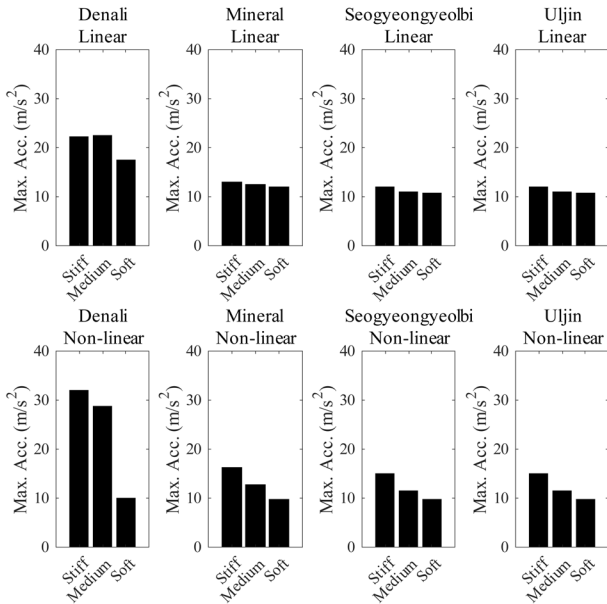


Fig. 7. Maximum magnitudes of accelerations at the tower head for stiffness of clay.

편차가 상당하다. 특히 이런 현상은 Denali 지진에서 더욱 두드러지는 것으로 보인다. 이런 특징으로 미루어볼 때 선형가정이 타당한 지반조건에서는 토양특성을 크게 신경 쓰지 않아도 되지만 선형가정 사용이 어려울 정도로 비선형성이 강한 상황 등 비선형스프링모형을 사용해야 하는 상황에선 토양특성을 반드시 신경 써 주어야 할 것이다.

4. 결론

이 논문에서는 지반-말뚝의 상호작용모형과 지반모형의 변화에 따라 twisted tripod 하부구조를 가진 해상 풍력발전기가 지진에 어떤 동적응답을 보이는지 분석했다. 지반-말뚝 상호작용은 고정단모형, 선형스프링모형, 비선형스프링모형 세 가지를 사용했으며, 지반모형은 단단한 흙, 중간 강도를 가진 흙, 무른 흙에 대해 검토 하였다. 지진은 국내지진 두 개와 해외지진 두 개를 적용하였으며 외국지진 중 하나는 강진, 다른 하나는 국내지진과 비슷한 진도를 가진 지진으로 선정 했다.

동적응답은 타워헤드의 최대 절대 가속도를 대푯값으로 선정해 분석했다. twisted tripod의 동적응답은 고정단모형에서 가장 크고 선형스프링모형, 비선형스프링모형 순으로 작아진다. 또한 선형스프링모형의 동적응답은 지반특성 변화에 둔감한 반면 비선형스프링모형의 동적응답은 상당히 민감하게 변한다.

이 논문의 연구는 토양성질과 지진지반가속도의 수가 다소 작고 타워헤드의 가속도만 비교분석 하였다.

또한 제시한 방법이 지반상태 및 말뚝-지반 간의 상호작용을 더욱 합리적으로 반영할 수 있는 일반적인 모델인지에 대한 결론을 내리기에는 아직 부족하다. 이 연구를 확장하여 많은 지진, 많은 종류의 토양성질에 대해 수치해석을 실시해 여러 종류의 동적응답에 대해 통계적 특성을 분석한다면 더 큰 도움이 될 것이라 기대한다.

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원(20163030024470)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) C. Baker, "Wind Engineering-Past, Present and Future", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., No. 95, pp. 843-870, 2007.
- 2) J. K. Kaldellis and D. Zafirakis, "The Wind Energy (R)evolution: a Short Review of a Long History", Renew. Energy, No. 36, pp. 1887-1901, 2011.
- 3) C. Golightly, "Tilting of Monopiles Long, Heavy and Stiff; Pushed Beyond Their Limits", Available Online: <http://www.nce.co.uk/Journals/2014/06/03/z/h/d/GE-January-2014-Tilting-of-monopiles-Golightly.pdf>
- 4) J. K. Kaldellis and D. P. Zafirakis, "Trends, Prospects, and R&D Directions in Wind Turbine Technology", Compr. Renew. Energy, No. 2, pp. 671-724, 2012.
- 5) W. Musial, S. Butterfield, and B. Ram, "Energy from Offshore Wind", In Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2006.
- 6) W. Gong, "Lattice Tower Design of Offshore Wind Turbine Support Structures", Master's Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2011.
- 7) L. Fenech, T. Sant and M. Muscat, "Design and Cost Evaluation of a Deep Water Support Structure for a Wind Turbine in Central Mediterranean Waters", In Proceedings of the European Wind Energy Conference, Brussels, Belgium, 2011.
- 8) I. W. Chen, B. L. Wong, Y. H. Lin, S. W. Chau and H. H. Huang, "Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines", Energies, MDPI, Vol. 264 No. 9, 2016.
- 9) Task Committee on Dynamic Analysis and Structural Design of Wind Turbine of Japan Society of Civil Engineering, "Structural Engineering Series 20, Guidelines for Design of Wind Turbine Support Structures and Foundations", JSCE/Committee on Structural Engineering, 2011.

- 10) J. H. Yi, S. B. Kim, T. H. Han and G. L. Yoon, "Probabilistic Assessment of Dynamic Properties of Offshore Wind Turbines Considering Soil-Pile Interaction", J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, Vol. 28, No. 4, pp. 343-350, 2015.
- 11) American Petroleum Institute, "Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design", American Petroleum Institute Publishing Service, Washington D.C., pp. 1-263, 2005.
- 12) B. C. Ahn and J. D. Lee, "Characteristics of Skin Friction on Compression Loaded Group Piles", J. Korean Soc. Saf., Vol. 19, No. 3, pp. 95-100, 2004.
- 13) J. D. Lee and B. C. Ahn, "Characteristics of Stress-Displacement on Uplift Loaded Group Piles", J. Korean Soc. Saf., Vol. 20, No. 3, pp. 152-157, 2005.
- 14) J. K. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim and T. M. Heo, "Development of Korean Standard Horizontal Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records", EESK J. Earthquake Eng., Vol. 20, No. 6, pp. 369-378, 2016.
- 15) S. H. Lee, J. H. Lee, T. X. Nghiem and S. R. Kim, "Development of Nonlinear Spring Modeling Technique of Group Suction Piles in Clay", J. Korean Geosynthetics Society, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10, 2015.
- 16) M. Hudson, "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles on Soft Clay", Offshore Technology Conference, North Central Expressway Dallas, Texas, 1970.
- 17) H. Kawai, K. Michishita, and A. Deguchi, "Design Wind Loads on a Wind Turbine for Strong Wind", Proceedings of the BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, 2008.