J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, 32(2)
pp.125~132, April, 2019
https://doi.org/10.7734/COSEIK.2019.32.2.125

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

부분집합 시뮬레이션 방법을 이용한 꼬인 삼각대 지지구조를 갖는 해상풍력발전기의 지진 신뢰성 해석

박 광 연[1] · 박 원 석[2†]

[1]한국건설기술연구원 지진안전연구센터, [2]목포대학교 토목공학과

Seismic Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine with Twisted Tripod Support using Subset Simulation Method

Kwang-Yeun Park[1] and Wonsuk Park[2†]

[1]*Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea*
[2]*Department of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan, 58554, Korea*

Abstract

This paper presents a seismic reliability analysis method for an offshore wind turbine with a twisted tripod support structure under earthquake loading. A three dimensional dynamic finite element model is proposed to consider the nonlinearity of the ground-pile interactions and the geometrical characteristics of the twisted tripod support structure where out-of-plane displacement occurs even under in-plane lateral loadings. For the evaluation of seismic reliability, the failure probability was calculated for the maximum horizontal displacement of the pile head, which is calculated from time history analysis using artificial earthquakes for the design return periods. The application of the subset simulation method using the Markov Chain Monte Carlo(MCMC) sampling is proposed for efficient reliability analysis considering the limit state equation evaluation by the nonlinear time history analysis. The proposed method can be applied to the reliability evaluation and design criteria development of the offshore wind turbine with twisted tripod support structure in which two dimensional models and static analysis can not produce accurate results.

Keywords : *offshore wind turbine, twisted tripod support, seismic reliability, subset simulation, Markov Chain Monte Carlo*

1. 서 론

해상풍력발전기의 지지를 담당하는 하부구조형식 중에서 꼬인 삼각대(twisted tripod) 형식은 비교적 최근에 제안되어 사용되고 있다(Chen *et al.*, 2016). 이 형식은 가장 많이 쓰이는 자켓(jacket)과 일반 삼각대(tripod) 형식의 하부구조에 비해 간단한 구조로서 제작 단가가 낮고 시공 및 유지보수 비용이 저렴하다(Fenech *et al.*, 2011). 또한 간단한 구조로 인해 조류, 파도, 바람과 같은 외부 하중의 영향이 상대적으로 적은 것으로 알려져 있다(Gong, 2011). 하지만 이 형식의 구조물에 대한 지진하중에 대한 연구는 많은 연구가 이루어져 있지 않다(Park and Park, 2018). 이 논문에서는 지진 하중을 받는 꼬인 삼각대 지지구조를 갖는 해상풍력발전기의 지진 신뢰성 해석 방법을 제시한다.

이 연구에서 지진 신뢰성 해석은 특정 강도의 지진에 대한 구조물 응답 소요(demand)로부터 계산할 수 있는 한계상태식에 대한 파괴확률 또는 신뢰성지수를 산정하는 것을 말한다. 즉, 특정한 세기의 지진에 대한 조건부 확률로서 지진 신뢰성을 평가한다. 이 연구에서 고려하는 지진의 강도는 구조물의 사용수명 동안 발생하는 지진의 초과발생확률에 의해 분류된 평균재현주기로 나타내는 설계지진의 세기를 사용한다. 불확실성 인자는 꼬인 삼각대 지지 구조물과 말뚝 기초 및 지반모형을

† Corresponding author:
Tel: +82-61-450-2471; E-mail:wonsuk@mokpo.ac.kr
Received December 31 2018; Revised January 8 2019;
Accepted January 9 2019
©2019 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.

고려한 동적 유한요소모델의 파라미터를 확률 변수로 모델링하여 고려한다. 구조물의 지진 응답 소요는 지반-말뚝 상호작용과 지반의 비선형성을 고려한 동적 유한요소해석으로 구한다. 시간이력해석에 의해 최대 응답을 산정하고 Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 샘플링 방법을 적용한 부분집합 시뮬레이션으로 한계상태식에 대한 파괴확률을 계산하였다.

해상에 설치되는 풍력발전기 및 지지구조물의 파괴는 구성요소별로 다양하게 나타날 수 있다. 이 연구에서는 꼬인 삼각대 지지구조물 말뚝 두부의 수평변위를 대상으로 하였다. 특히 꼬인 삼각대 지지구조물은 사각 재킷이나 일반 삼각대와 같은 평면 대칭형 구조와 달리 일방향 지진 입력에 대해서도 면외 응답이 발생하므로 이를 고려한 3차원 구조 해석 모델을 사용하였다.

이하에서는 신뢰성 해석 절차에 사용되는 동적 유한요소해석 모델 및 입력지반운동 모델을 제시한다. 이어서 신뢰성 해석을 위한 한계상태식, 확률 변수와 함께 이 연구에서 신뢰성 해석에 사용한 방법인 MCMC 샘플링 방법을 적용한 부분집합 시뮬레이션 방법을 소개하고 신뢰성 해석 결과 및 결론을 제시한다.

2. 지진 신뢰성 해석을 위한 동적 유한요소해석 모델

2.1 풍력발전기 및 꼬인 삼각대 지지 구조

전체 구조물은 크게 팬 및 나셀, 타워, 하부구조물, 말뚝으로 구분할 수 있다. 말뚝을 제외한 구조물 전체 높이는 131m이다.

팬과 나셀은 동적효과 없이 타워 최상단에 3500kN의 집중질량으로 모델링했다. 타워, 하부구조물, 말뚝은 질량밀도와 강성이 각각 7800kg/m^3, 200GPa인 구조용 강재로 제작된 원형 강관을 가정한 3차원 들보로 모델링했다. 타워는 높이 65m, 지름 6m, 두께 0.04m 인 원형 강관이다. 하부구조물은 Fig. 1에 그려져 있는 Chen(2016)의 0° 꼬인 삼각대 구조를 이용했다. 삼각대의 외각 뼈대를 이루는 다리는 길이, 지름, 두께가 각각 66.86, 1.80, 0.04m이다. 삼각대의 뼈대는 상단 대각, 하단 대각, 상단 수평, 하단 수평 보강 부재 등 4 종류의 보강부재로 보강되어 있다. 상단 대각 부재의 길이, 지름, 두께는 각각 17.23, 0.90. 0.06m이며 하단 대각 부재는 50.85, 1.20, 0.06m, 상단 수평부재는 11.07,0.90, 0.03m, 하단 수평 부재는 24.41, 0.90, 0.03m로 모델링 되었다. 말뚝은 Yi(2015)에 제시된 말뚝의 규격과 관입깊이 등을 참고해 전체 구조물과 관입말뚝의 비율이 비슷하도록 길이, 지름, 두께를 각각 25, 1.8, 0.04m로 결정했다.

동적유체질량은 Goyal(1989)에 제시된 추가질량 중 충분히 길고 균일한 형상을 가진 원형 단면에 대한 추가질량을 사용했다. 말뚝이 유체에서 동적 움직임을 가질 경우 유체와의 상호작용

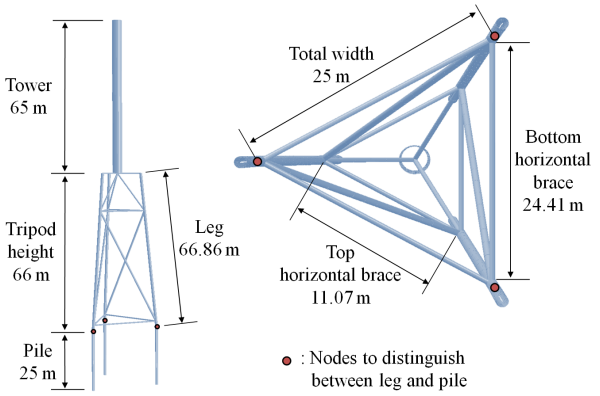


Fig. 1 Bird tiew of the tripod and tower model

으로 인해 관성이 커진 효과가 나타나게 된다. 관성이 커진 효과는 실제 질량에 동적유체질량을 추가하는 형식으로 모형화할 수 있다.

$$m_v = m_r + m_o + m_i \tag{1}$$

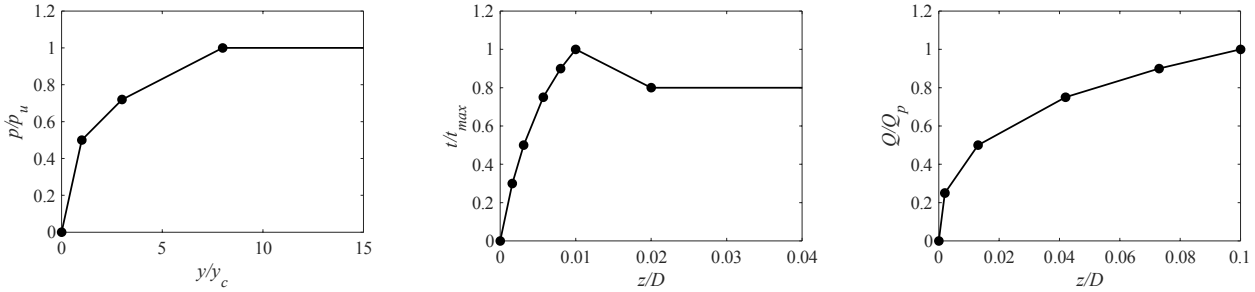
여기서, m_v, m_r, m_o, m_i는 각각 동적유체질량이 적용된 가상 질량밀도, 실제질량밀도, 관 외부를 감싸는 유체에 의한 추가 질량밀도, 관 내부에 들어있는 유체에 의한 추가질량밀도를 의미한다. 질량밀도는 모두 말뚝의 길이 당 질량밀도이다. 기둥이 충분히 길고 균일한 원형 관 단면을 가질 경우 내, 외부의 추가 질량은 다음 식으로 구한다.

$$m_o = \rho_w \pi r_o^2,\ \ m_i = \rho_w \pi r_i^2 \tag{2}$$

위 식에서 ρ_w는 유체의 부피당 질량밀도이며, r_o^2와 r_i^2는 각각 원형 관 외부, 내부의 반지름이다. 실제 유체는 바닷물이지만 담수로 가정하고 물의 질량밀도인 ρ_w =1000kg/m^{3}을 사용했다. 추가된 질량은 기둥의 관성이 증가 한 현상을 설명하기 위한 것이며 실제로 질량이 증가한 것이 아니다. 하지만 이 논문에서는 중력에 의한 자중을 질량에 비례한 힘으로 설정했기 때문에 추가 질량에 의한 자중이 자동으로 추가되었다. 이를 해결하기 위해 중력 반대방향으로 추가질량에 의한 자중과 같은 크기의 분포하중을 가해 상쇄시켜 주었다.

2.2 말뚝-지반 상호작용 모델

말뚝과 지반의 상호작용 모델은 Lee(2015)의 지반-말뚝 상호작용 모델을 사용했다. 들보로 가정한 말뚝에 다수의 비선형스프링을 부착해 횡하중, 연직마찰력, 선단지지력을 모델링한다.



(a) (b) (c)

Fig. 2 Nonlinear soil-pile Interactions of: (a) $p-y$, (b) $t-z$ and (c) $Q-z$

비선형 스프링의 강성은 API(2005)에서 사용한 Winkler의 모델을 사용했다. Winkler의 비선형지반 모델은 횡하중-변위, 연직마찰력-변위, 선단지지력-변위 관계를 각각 $p-y$, $t-z$, $Q-z$ 관계를 이용해 표현한다. 여기서 p, t, Q는 각각 지반이 말뚝에 가하는 수평저항력, 수직마찰력, 선단지지력이며 z와 y는 각각 수직변위와 수평변위를 의미한다. 세 개의 비선형관계는 다수의 선형구간으로 조합된 비선형 함수를 가지고 있다(Fig. 2).

Fig. 2의 모델을 사용하기 위해선 각각 극한수평저항력, 최대압축응력 50%수준의 말뚝수평변위, 말뚝 직경, 최대수직마찰력, 최대선단지지력을 의미하는 p_u, y_c, D, $t_{\max}$, Q_p를 결정해야한다. API(2005)는 각 계수의 값을 토양 종류와 단단한 정도에 따라 분류해 제시하고 있는데, 여기서는 중간강도의 흙(medium clay) 기준으로 계수의 평균값을 결정했다. 지반관입 깊이에 따른 지반 특성 변화는 고려하지 않고 균질한 중간강도의 흙이 분포한 것으로 가정한다.

극한수평저항력은 다음 식으로 계산한다.

$$\begin{cases} p_u = 3c + \gamma X + JcX/D & when\, X < X_R \\ p_u = 9c & when\, X \geq X_R \end{cases} \tag{3}$$

여기서, c, X, γ, J는 각각 토양의 비배수 전단강도, 표면으로부터의 깊이, 토양의 유효단위중량, 경험적 무차원 계수이며 $X_R = 6D/(\gamma D/c + J)$이다. 중간강도의 흙 기준으로 비배수 전단강도는 36kPa가 제시되어 있으며, 신뢰성 해석에서는 이 값을 기준으로 무작위성을 고려한다. 경험적 무차원계수와 토양의 유효단위중량은 각각 0.4, 18kN/m^{3}으로 하였다.

최대 압축응력 50% 수준의 말뚝수평변위는 다음 식으로 결정한다.

$$y_c = 2.5\epsilon_c D \tag{4}$$

여기서, ϵ_c는 최대압축응력 50% 수준에서 발생하는 말뚝 수평변형도를 의미하는데, 일반적인 흙에서의 추천 값인 0.01을 적용했다.

최대수직마찰력은 중간 강도의 흙에 대해 67.0kPa, 최대선단지지력은 중간강도의 흙에 대해 2.9MPa를 기준으로 하여 확률변수로 모델링하였다.

2.3 하중 모델

풍력발전기를 받치는 꼬인 삼각대 지지구조물과 타워에는 파도, 해류, 바람, 지진하중이 가해진다. 이중 파도, 해류, 바람하중은 Chen(2016)에서 사용한 사용하중을 기준으로 무작위성을 고려했고, 지진하중은 삼각대 세 면 중 한 면에 수직으로 적용했으며, 파도, 해류, 바람하중은 악조건을 고려해 지진과 같은 방향으로 가해지는 것으로 가정했다.

이 연구에 사용된 파도하중과 해류하중은 각각 200.384A kN/m, 8.008DkN/m이다. 여기서 A와 D는 각각 부재의 외경이 감싸는 m^2 단위의 단면적과 부재 외경의 m단위 지름이다. 이 논문에서는 주어진 파도하중과 해류하중을 평균값으로 하였다. 파도하중과 해류하중은 각각 해수면 기준 -29m~+3m사이와 해저부터 해수면까지 가해지며 대략적인 위치가 Fig. 3에 표시되어 있다. 이때 해수면 높이는 50m로 정했다.

바람하중은 해수면과 타워 최상단까지 작용하며 Fig. 3에 대략적인 위치가 표시되어 있다. 바람하중은 다음과 같이 산정한다.

$$f_{wind} = \frac{1}{2}\rho_{air} U^2 C_D D \tag{5}$$

위 식에서 f_{wind}, ρ_{air}, U, C_D는 각각 바람하중, 공기밀도, 풍속, 항력계수이다. 공기밀도는 통상 사용되는 1.293kg/m^{3}으로 결정했으며 항력계수는 원형단면에 대해 알려진 0.9를 사용했다. 풍속은 국내 해안에 대해 일반적으로 사용되는 7m/s를 평균값으로 하였다.

팬과 나셀은 집중질량으로 표했기 때문에 바람에 대한 효과를

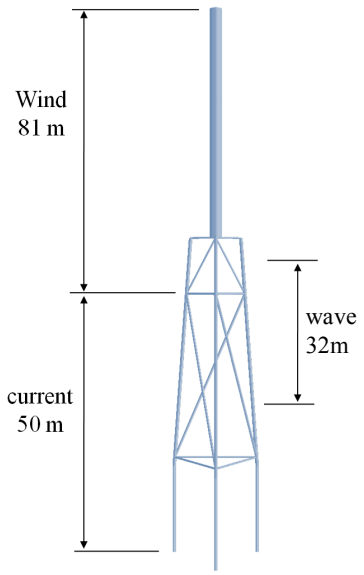


Fig. 3 Wind, current and wave loading ranges

따로 계산해 타워 상단부에 가해지는 집중하중으로 모델링했다. 팬에는 정면, 상하, 좌우 각각 389.48kN, 4112kN, 1185 kN를, 나셀에는 정면, 상하, 좌우 각각 51.77kN, 4.05kN, 102.26kN이 가해지는 것으로 가정했다.

2.4 입력 지반운동 시간이력

일반적으로 해상풍력발전기의 지진응답해석을 위해서는 발전기가 설치될 해역의 지반조건 및 국지적인 토질조건 등을 고려한 지반운동모델을 선정한다. 이 연구에서는 설치지역을 특정하지 않고 내진설계기준 공통적용사항의 설계응답스펙트럼에 상응하는 인공지진파를 생성하여 사용하였다. 지진구역 I 및 암반지반 S_1, 5% 감쇠비에 대한 수평지반운동 가속도 응답스펙트럼을 이용하였다. 입력지반운동 가속도는 말뚝 선단부의 기반암에만 작용하는 것으로 가정하였고, 공통 적용사항의 설계지진 분류체계와 내진등급 분류체계를 고려하여 지진의 강도를 정하였다. 기능수행수준 한계상태식에 대한 신뢰성 해석을 위해 설계지진재현주기 50년, 100년 및 200년, 붕괴방지수준 신뢰성 해석을 위해 1000년, 2400년, 4800년 강도의 지진을 고려하였다. 인공지진파 생성을 위한 포락함수는 상승시간 1초, 강진동지속시간 5초, 하강시간 7.5초를 사용하였다(Fig. 4).

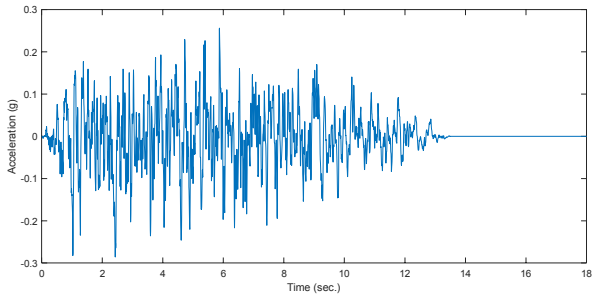


Fig. 4 An input ground acceleration time history (Return period 2400 year)

2.5 동적 수치해석

동적수치해석은 ABAQUS를 이용해 진행했으며 지반, 말뚝, 꼬인 삼각대 지지구조물, 타워를 모두 포함한다. 꼬인 삼각대 지지구조물, 타워, 말뚝은 ABAQUS에서 지원하는 3차원 파이프 단면 들보요소를 이용했으며, 말뚝-지반 상호작용모델은 비선형 와이어 요소에 Fig. 2로 정의된 비선형특성을 압축, 인장에 동일하게 적용해 만들었다. 유한요소 이산화는 ABAQUS의 요소 자동생성 기능을 써서 2m내외의 요소가 생성되도록 했다. 동해석은 implicit dynamic으로 수행했으며 시간간격은 0.02초, 전체 해석시간은 15초로 했다.

3. 지진 신뢰성 해석

3.1 한계상태식 및 확률변수 모델

이 연구에서 대상으로 삼은 해상풍력발전기의 한계상태는 해상풍력발전기에 작용하는 주요 하중이 수평하중임을 고려하여 지지구조물 하부 말뚝 두부의 수평변위의 설계 기준값을 한계상태로 하였다. 다음과 같이 한계상태식을 정의한다.

$$g(\mathbf{x}) = \max_{t} \delta(\mathbf{x},t) - \delta_a \tag{6}$$

여기서, $\delta(\mathbf{x},t)$는 말뚝 두부의 지반에 대한 상대변위 시간이력이며, δ_a 허용 수평변위 값이다. 이 연구에서 허용 수평변위는 기능수행수준에 대해서는 38mm, 붕괴방지수준에 대해서는 말뚝 직경의 1%인 180mm로 하였다. 한계상태식 계산을 위한

Table 1 Descriptions of random variables

Name		Type	Mean	C.O.V.
Soil	Undrained shear strength c(kPa)	Normal	36	0.1
	Max. vertical friction $t_{\max}$ (kPa)	Normal	67	0.1
	Max. tip bearing force Q_p (MPa)	Normal	2.9	0.1
Tripod	Elastic coefficient of steel E(MPa)	Normal	205,000	0.1
Loads	Current load(kN/m)	Normal	8.008	0.2
	Wave load(kN/m)	Normal	200.384	0.2
	Wind speed(m/s)	Normal	7	0.2

말뚝 두부의 최대 수평변위는 입력 지반운동 가속도에 의한 시간이력응답으로부터 최대값을 산정하여 결정한다. 최대값의 산정은 같은 강도의 입력 지반운동에 대하여 3개의 독립적인 시간이력해석을 수행하고 그 중 최대 응답을 최대값으로 취하였다. 또한 말뚝 두부의 수평변위는 꼬인 삼각대지지 구조 특성으로 인해 지진력 작용 방향 및 면외 방향으로도 나타나므로 두 방향을 동시에 고려한 최대값을 계산하였다.

이 연구에서 설정한 확률변수 $\mathbf{x}$는 말뚝-지반 상호작용 모형의 주요 모델 파라미터 3개, 구조물 1개 및 파도, 해류, 바람하중의 3개 등 총 7개이다. Table 1에 고려한 확률변수를 나타내었다.

3.2 부분집합 시뮬레이션을 이용한 신뢰성 해석

시뮬레이션 방법을 이용한 신뢰성 해석 방법은 일반적으로 비선형성이 강한 한계상태함수에 대하서도 높은 정확도로 파괴확률을 구할 수 있다. 그러나 고전적인 몬테카를로 시뮬레이션 방법에서는 파괴확률에 반비례하는 많은 시뮬레이션 횟수가 필요하므로 효과적인 샘플링을 통해 변동성을 감소시켜 시뮬레이션 횟수를 줄이는 여러 가지 방법이 연구되어 왔다. 이 연구에서는 한계상태식 값 계산에 시간이 소요되는 동적 유한요소해석이 포함되므로 효과적인 샘플링을 위한 부분집합 시뮬레이션 방법을 적용하였다. 부분집합 시뮬레이션 방법은 순차적으로 포함되는 부분집합(nested subset)으로 구성된 파괴 사건 집합에 대한 조건부 확률의 곱으로 파괴확률을 구하는 방법이다. 이 방법은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Au and Beck, 2001).

순차적으로 포함되는 j번째 부분 파괴사건 집합(failure event set)을 F_j라고 하면 표준 정규 확률변수 공간에서 전체 파괴사건 집합 $F=\{G(\mathbf{u}) \le 0, \mathbf{u} \in \mathrm{R}^n\}$는 다음과 같다.

$$F=\bigcap_{j=1}^{M} F_j, \qquad F_1 \supset F_2 \supset \ldots \supset F_M \tag{7}$$

이들 부분 파괴사건 집합의 관계를 이용하면 전체 파괴사건 집합에 대한 파괴 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_f = \Pr(F) = \prod_{j=1}^{M} \Pr(F_j | F_{j-1}) \tag{8}$$

식 (8)의 조건부 확률을 계산하기 위해 $j=M$인 마지막 단계를 제외한 모든 중간 단계 $j=1,\ldots,M-1$의 조건부 확률이 동일한 값 p_0를 가지도록 F_j 를 잡는다면, 파괴확률 P_f는 다음과 같이 계산된다.

$$P_f = \prod_{j=1}^{M} \Pr(F_j | F_{j-1}) = p_0^{M-1} \Pr(F_M | F_{M-1}) \tag{9}$$

식 (8)에서 F_1부터 F_{M-1}까지 중간 단계의 순차적 조건부 파괴확률 값이 동일한 값 p_0가 되도록 하는 방법은 다음과 같은 샘플링 방법을 사용한다. 첫 단계 부분집합 $F_1=\{\mathbf{u}: G(\mathbf{u}) \le c_1\}$을 찾기 위해 N개의 표준 정규 확률변수 샘플 $\mathbf{u}^{(k)}(k=1,\ldots,N)$에 대하여 $G^{(k)}(\mathbf{u}^{(k)})$를 계산하고 내림차순으로 정렬한다. 정렬된 값에서 $N_s=p_0N$ 번째의 값을 $G^{(N_s)}(\mathbf{u}^{(N_s)})=c_1$이라 하면, $\Pr(F_1|F_0)=\Pr(F_1)=p_0$이고, $F_1=\{\mathbf{u}: \mathbf{u}^{(k)}, k=1,2,\ldots,N_S\}$이 된다. 두 번째 이후의 단계에서는 첫 단계의 조건인 $G(\mathbf{u}) \le c_1$를 만족하는 확률변수를 샘플링하여 $F_1 \supset F_2$ 관계를 만족하도록 하고 동일한 방법으로 $\Pr(F_2|F_1)=p_0$인 $F_2=\{\mathbf{u}: G(\mathbf{u}) \le c_2 < c_1\}$를 얻는다. 이러한 방법으로 파괴확률을 계산하는 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

Step 1 표준정규분포에서 $\mathbf{u}_0^{(k)}$ $(k=1,\ldots,N)$ 생성한다.

Step 2 내림차순으로 정렬하여 $G^{(N_s)}(\mathbf{u}^{(N_s)})=c_1$ 찾고 $F_1=\{\mathbf{u}: G(\mathbf{u}) \le c_1\}$, $j=1$

Step 3 전 단계의 N_s개 샘플을 시드(seed)로 하여 총 N개의 $\varphi_n(\mathbf{u}|F_j)$ 샘플을 생성한다.

Step 4 내림차순으로 정렬하여 $G^{(N_s)}(\mathbf{u}^{(N_s)})=c_{j+1}$ 찾고 $F_{j+1}=\{\mathbf{u}: G(\mathbf{u}) \le c_{j+1}\}$, $j=j+1$

Step 5 $c_j>0$이면 Step 3으로 반복한다.

Step 6 $P_f \approx p_0^{M-1} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} I_F(\mathbf{u}_{M-1}^{(k)})$

위 알고리즘의 Step 6 파괴확률 계산에는 다음과 같이 식 (9)의 $\Pr(F_M|F_{M-1})$값을 파괴 영역에 있는 샘플 개수를 사용한 추정값을 사용하였다.

$$\Pr(F_M | F_{M-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} I_F(\mathbf{u}_{M-1}^{(k)}) \tag{10}$$

여기서, $\mathbf{u}_{M-1}^{(k)}$은 F_{M-1}에 속하는 표준 확률변수의 k번째 샘플이며, $I_F(\mathbf{u})$는 지시함수(indicator function)로서 $G(\mathbf{u}) \le 0$ 때 $I_F(\mathbf{u})=1$이고 그 이외에는 $I_F(\mathbf{u})=0$이다.

이 방법에서 중간 단계 확률 p_0값은 전체 적인 단계 수를 조절하는 역할을 한다. 이 값이 작으면 각 단계에서 필요한 시뮬레이션 횟수는 증가하지만, 전체 파괴 확률을 계산할 때 필요한 단계 수는 줄어들 수 있다. 반대로 큰 p_0 값을 사용하면, 단계 별 시뮬레이션 횟수는 줄고, 전체 단계 수는 늘어난다. 일반적으로 이 값은 10^{-1} 수준으로 하여 0.1~0.3 정도의 값을

사용하는 것이 효율적인 것으로 알려져 있다(Zuev *et al.*, 2012).

3.3 부분집합 시뮬레이션의 MCMC 샘플링

부분집합 시뮬레이션 방법의 중간 단계에서는 조건부 표준정규분포 확률밀도함수 $\varphi_n(\mathbf{u}|F_j)$에서 샘플링이 필요하다. 즉, $j-1$단계의 샘플 집합 $\{\mathbf{u}_{j-1}^{(k)}: k=1,...,N_s\}$의 각 샘플로 부터 다음 단계의 추가 샘플 $N-N_s$개를 추출한다. 추가 샘플들은 목표 확률밀도함수 $\varphi_n(\mathbf{u}|F_j)$에 상응하도록 연쇄적으로 생성함으로써 각 단계에서 부분집합 F_j를 구성할 수 있다. 이 연구에서는 마르코프 연쇄 몬테 카를로(Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 방법으로 샘플링하여 조건부 확률을 계산하였다(Tierney, 1994; Beck and Au, 2002). 가장 널리 사용되는 MCMC 샘플링 방법으로는 Metropolis-Hastings(M-H) 알고리즘이 있다(Fishman, 2013; Metropolis *et al.*, 1952). 이 알고리즘에서는 현재 샘플 $\mathbf{u}_0$에 기반한 제안 확률밀도함수(proposal PDF) $q(\cdot|\mathbf{u}_0)$로부터 후보 샘플 $\boldsymbol{\xi}$를 추출하고, 확률적으로 후보 샘플을 다음 샘플로 채택($\mathbf{u}_1=\boldsymbol{\xi}$)하거나 기각($\mathbf{u}_1=\mathbf{u}_0$)한다. 개략적으로는 후보 샘플을 채택할 때에는 목표 확률밀도함수 값이 현재 샘플의 목표확률밀도함수 값 보다 큰 경우에만 채택되도록 하여 생성된 샘플의 빈도가 목표 확률밀도함수의 값에 비례하도록 만든다.

이 연구에서는 기본 M-H 알고리즘을 개선한 성분별(component-wise) M-H 알고리즘을 적용하였다. 이 방법은 고차의 확률변수를 가진 문제에 적합한 것으로 알려져 있다(Papaioannou *et al.*, 2015). 다음과 같은 단계를 거쳐 샘플 $\mathbf{u}_0$로 부터 확률밀도함수 $\varphi_n(\mathbf{u}|F_j)$의 마르코프 연쇄 샘플 $\mathbf{u}_1$을 생성한다.

Step 1 표준정규분포 확률밀도함수 $\varphi_n(\cdot)$에서 추출되는 후보 샘플 $\mathbf{v}=(v_1,v_2,...,v_n)$의 i번째 성분을 각각 다음과 같이 결정한다.

a. 후보 샘플 성분 ξ_i를 제안 확률밀도함수 $q(\cdot|u_{0i})$로부터 생성한다.

b. 후보 샘플 성분 ξ_i를 다음 식으로 채택 또는 기각한다.

$$v_i=\begin{cases}\xi_i & with\,prob.\ a_i(u_{0i},\xi_i)\\ u_{0i} & with\,prob.\ 1-a_i(u_{0i},\xi_i)\end{cases} \tag{11}$$

여기서, $$a_i(u_{0i},\xi_i)=\min\left[1,\frac{\varphi(\xi_i)q(u_{0i}|\xi_i)}{\varphi(u_{0i})q(\xi_i|u_{0i})}\right] \tag{12}$$

Step 2 후보 샘플 $\mathbf{v}$가 F_{j-1}의 원소이면 다음 연쇄 샘플로 채택하고 아니면 현재 샘플을 그대로 사용한다.

$$\mathbf{u}_1=\begin{cases}\mathbf{v}, & \mathbf{v}\in F_{j-1}\\ \mathbf{u}_0, & \mathbf{u}_0\notin \mathrm{F}_{\mathrm{j}-1}\end{cases} \tag{13}$$

이 연구에서 제안 확률밀도함수 $q(\cdot|u_{0i})$는 u_{0i} 중심으로 폭이 2인 균등(uniform) 분포를 사용하였다.

3.4 지진 신뢰성 해석 및 결과

제시한 부분집합 시뮬레이션을 이용하여 꼬인 삼각대 구조로 지지된 해상풍력발전기 모델의 말뚝에 대한 지진 신뢰성 해석을 수행하였다. 부분집합 시뮬레이션의 중간 단계 확률 p_0는 0.1로 하여 한 단계씩 늘어날 때마다 파괴확률이 10^{-1}단위로 감소하는 것을 확인할 수 있도록 하였다. 중간 단계 확률 p_0가 0.1임을 고려하여 각 단계별 샘플링 개수 N은 1000개로 하여 계산하였다. 부분집합 시뮬레이션 및 MCMC 샘플링 등 전체적인 신뢰성 해석은 MATLAB을 이용하였으며, 한계상태식 계산을 위한 동적 유한요소해석에는 ABAQUS를 사용하였다. 계산에는 8개의 core를 가진 3.2GHz Intel Xeon 프로세서를 장착한 PC를 사용하였고, MATLAB의 Parallel Computing Toolbox를 이용하여 한계상태식 평가를 병렬처리하여 계산 효율을 높였다. 제시한 계산 환경에서 1000개의 샘플에 대한 한계상태 평가에는 약 5시간 35분이 소요되었고, 한 단계를 계산하는데 소요된 시간은 약 6시간 40분 정도가 소요되었다.

제시한 한계상태 식에 대한 신뢰성 해석 결과를 Table 2에 정리하였다. 해석 결과 대상 구조물은 기능수행 수준 검토를 위한 한계상태에 대하여 재현주기 50년 이하의 낮은 강도 지진에 대해서는 파괴확률 $P_f=8.730\times10^{-4}$ 수준의 신뢰도를 보이고 있으나 그 이상의 지진에 대해서는 말뚝 두부 수평변위 기준 38mm를 초과하는 양상을 보였다. 붕괴방지 수준의 한계상태에 대해서는 재현주기 2400년 설계지진 수준에서 파괴확률 $P_f=2.160\times10^{-2}$수준의 신뢰도를 보였고 4800년 설계지진 수준에서는 90% 이상의 매우 높은 확률로 수평변위기준

Table 2 Probability of failures and reliability indices for the twisted tripod support under various seismic loading scenarios

Performance level	Limit state (mm)	Return period (year)	P_f	β
Operational	38	50	8.730×10^{-4}	3.130
		100	1.0	-
		200	1.0	-
Collapse Preventing	180	1000	10^{-15} below	-
		2400	2.160×10^{-2}	2.022
		4800	0.9040	-1.3047

180mm를 초과할 것으로 계산되었다. 풍력발전기 지지구조물에 대한 하부구조 기준에서는 내진설계시 신뢰성 해석에 기반한 한계상태 및 목표신뢰성 지수값을 명시적으로 제시하고 있지는 않기 때문에 이 신뢰성 해석의 결과를 바탕으로 하여 현 대상 구조물의 내진성능을 직접적으로 평가하긴 어렵다. 간접적인 평가로서 내진설계기준 공통적용사항에 제시된 시설물의 내진등급별 최소 내진성능수준을 참고하면 다음과 같다. 이 기준에서는 재현주기 50년의 설계지진에 대하여 기능수행 수준을 만족하는 수준은 내진II등급, 재현주기 1000년에 대하여 붕괴방지 수준을 만족하는 수준은 내진I등급으로 분류된다. 이 기준으로 볼 때 이 연구의 대상 구조물은 내진I등급 혹은 내진II등급 정도의 내진성능수준이 요구하는 성능수준으로 평가된다.

4. 결 론

이 연구에서는 지진 하중을 받는 꼬인 삼각대 지지구조를 갖는 해상풍력발전기의 지진 신뢰성 해석 방법을 제시하였다. 평면 2차원 모델로는 수평하중에 대해서 면외 변위가 발생하는 꼬인 삼각대 지지구조물의 기하학적 특성을 고려하기 위해 3차원 유한요소 모델을 개발하였다. 지진신뢰성은 말뚝 두부의 수평변위로 정의된 한계 상태식에 대하여 파괴확률을 산정하였고, 재현주기별 인공지진파를 사용한 시간이력 해석을 통해 수평변위의 최대 응답을 구하였다. 신뢰성 평가를 위한 한계상태식 계산은 매우 많은 수의 확률변수 샘플에 대하여 이루어 져야 하므로 비선형 시간이력해석에 의한 한계상태식 평가를 고려하여 효율적으로 신뢰성 해석을 하기 위해 MCMC 샘플링 방법을 적용한 부분집합 시뮬레이션 방법을 적용하였다. 해석 결과 대상 구조물은 기능수행 수준 한계상태에서 재현주기 50년 이하의 낮은 지진에 대하여 신뢰성 지수 $\beta=3.13$ 수준의 신뢰도를, 붕괴방지 수준 한계상태에서 재현주기 2400년 설계지진 수준에서 신뢰성지수 $\beta=2.022$ 수준의 신뢰도를 보였다.

제시한 모델 및 신뢰성 해석 방법은 2차원 모델 및 정적해석만으로는 정확한 결과를 도출할 수 없는 꼬인 삼각대 지지구조를 갖는 해상풍력발전기의 신뢰성 평가 및 설계기준 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대 된다. 향후 추후 연구가 필요한 설계기준 개발을 위한 신뢰성 해석을 위해서는 확률 변수의 분포모델 및 파라미터에 대한 축적된 연구가 필요하고, 주요 파괴모드를 고려한 다양한 한계상태 식에 대한 신뢰성 평가가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호 : 20163030024470, 해상풍력발전기용 지지구조물 설치를 위한 원격제어 굴착기 개발 및 실증).

References

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

Au, S.-K., Beck, J.L. (2001) Estimation of Small Failure Probabilities in High Dimensions by Subset Simulation, *Prob. Engi. Mech.*, 16, pp.263~277.

Beck, J.L., Au, S.K. (2002) Bayesian Updating of Structural Models and Reliability using Markov Chain Monte Carlo Simulation, *J. Eng. Mech.*, 128(4), pp.380~39.

Chen, I.W., Wong, B.L., Lin, Y.H., Chau, S.W., Huang, H.H., (2016) Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines, *Energies*, 264(9).

Fenech, L., Sant, T., Muscat, M. (2011) 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.

Fishman, G., (2013) *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer Science & Business Media.

Gong, W. (2011) Lattice Tower Design of Offshore Wind Turbine Support Structures, *Master's Thesis*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

Goyal, A., Chopra. A.K, (1989) Simplified Evaluation of Added Hydrostatic Mass for Intake Towers, *J. Eng. Mech.*, 115(7), pp.1393~1412.

Lee, S.H., Lee, J.H., Nghiem, T.X., Kim, S.R. (2015) Development of Nonlinear Spring Modeling Technique of Group Suction Piles in Clay, *J. Korean Geosynthetics Society*, 14(1), pp.1~10.

Lee, J.D., Ahn, B.C. (2005) Characteristics of Stress-Displacement on Uplift Loaded Group Piles, *J. Korean Soc.Saf.*, 20(3), pp.152~157.

Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E. (1953) Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, *J.*

Chem. Phys., (21)6, pp.1087~1092.

Papaionaanou, I. Betz, W., Zwirglmaier, K., Straub, D. (2015) MCMC algorithms for Subset Simulation, *Probab. Eng. Mech.*, 41, pp.89~103.

Park, K.-Y., Park, W. (2018) Evaluation of Pile-Ground Interaction Models of Wind Turbine with Twisted Tripod Support Structure for Seismic Safety Analysis, *J. Korean Soc. Saf.*, 33(1), pp.81~87.

Tierney, L. (1994) Markov Chains for Exploring Posterior Distribution, *The Annals of Statistics*, pp.1701~1728.

Yi, J.H., Kim, S.B., Han, T.H., Yoon, G.L. (2015) Probabilistic Assessment of Dynamic Properties of Offshore Wind Turbines Considering Soil-Pile Interaction, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(4), pp.343~350.

요 지

이 논문에서는 지진 하중을 받는 꼬인 삼각대 지지구조를 갖는 해상풍력발전기의 지진 신뢰성 해석 방법을 제시한다. 수평하중에 대해서 면외 변위가 발생하는 꼬인 삼각대지지 구조의 기하학적 특성과 지반의 비선형성을 포함한 지반-말뚝 상호작용을 고려하기 위한 구조물의 3차원 동적 유한요소 모델을 제시하였다. 지진신뢰성 평가를 위해 재현주기별 인공지진파를 사용한 시간이력 해석을 통해 말뚝 두부의 수평변위로 정의된 한계 상태식에 대하여 파괴확률을 산정하였다. 비선형 시간이력해석에 의한 한계상태식 평가를 고려하여 효율적으로 신뢰성 해석을 하기 위해 Markov Chain Monte Carlo 샘플링 방법을 적용한 부분집합 시뮬레이션 방법의 적용을 제시하였다. 제시한 방법은 2차원 모델 및 정적해석만으로는 정확한 결과를 도출할 수 없는 꼬인 삼각대 지지구조를 갖는 해상풍력발전기의 신뢰성 평가 및 설계기준 개발에 활용될 수 있음을 보였다.

핵심용어 : 해상풍력발전기, 꼬인 삼각대 지지구조, 지진 신뢰성, 부분집합 시뮬레이션, Markov Chain Monte Carlo