

해양환경하중 및 지반의 불확실성을 고려한 중력식 해상풍력 기초의 신뢰성 해석

이상근* · 김동현**

*군산대학교 해양산업공학과

**군산대학교 해양공학과

Reliability Analysis of Gravity-based Offshore Wind Turbine Foundation Considering Ocean Environmental Loads and Soil Uncertainty

Sang Geun Lee* and Dong Hyawn Kim**

*Department of Ocean Industrial Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

**Department of Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

KEY WORDS: Offshore wind turbine 해상풍력발전, Gravity-based foundation 중력식 기초, Reliability analysis 신뢰성 해석, First-order reliability method(FORM) 일계신뢰도법

ABSTRACT: A reliability analysis of the gravity-based foundation of an offshore wind turbine was performed by considering the uncertainties of the design variables, including environmental loads. The limit state functions of the gravity-based foundation were defined using the response limits of the support structures suggested in the DNV standard. The wind load could be obtained using the GH_blded software, and the wave load was calculated using the Morison equation. Then, the extreme distributions of the wind and wave loads were estimated by applying the peak over threshold (POT) method to the wind and wave load data. The probability distribution characteristics of the soil properties were defined with reference to a southwest coast geotechnical survey report. The reliability index was evaluated for each failure mode using a first-order reliability method.

1. 서 론

풍력발전은 고효율과 친환경적인 이유로 급격한 발전을 거듭해 왔으며, 육상에 비해 양질의 풍황 조건을 갖춘 해상으로 그 영역을 확장하는 추세이다. 그리고 발전용량 증대를 위해 터빈 및 블레이드의 크기가 커짐에 따라 지지구조물의 크기 또한 대형화 되고 있다. 이러한 해상풍력터빈 지지구조물의 형태는 다양하지만 그 중 시공 사례가 많아 비교적 경험적인 지식이 풍부한 모노파일, 재킷 그리고 중력식의 형태가 주를 이루고 있다. 모노파일과 재킷 형태의 지지구조물은 해저지반에 근입된 강관 파일에 의해 지지되고, 중력식 기초의 경우 체체의 자중과 해저면의 마찰력으로 외력에 저항한다. 지반물성은 다른 설계 변수에 비해 불확실성이 매우 큰 요소이므로 고정식 해상풍력터빈의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 요인이라 할 수 있다.

그리고 해상이라는 환경적 요인으로 인해 지지구조물에는 상시 불규칙적인 파랑 및 풍하중이 작용하고 있다. 막대한 건설비용이 소요되고 국가 에너지원으로서 매우 중요한 시설물인 해상풍력터빈 지지구조물에 대한 경제적인 효율성과 충분한 안전성 확보를 위해서는 설계변수의 불확실성이 설계에 반영될 수 있도록 신뢰성 해석이 수행되어야 한다.

해상풍력 지지구조물에 대한 기존 연구는 주로 모노파일(Kirkegaard et al., 1990; Carswell et al., 2014) 및 재킷(Cossa et al., 2011; Lee et al., 2014)에 대해 수행되었다. 그러나 하중과 지반물성의 불확실성을 동시에 고려하지 못하였으며, 수평력과 모멘트를 독립적인 확률변수로 취급하여 설계하중이 합리적으로 반영되지 못한다는 제한사항이 존재하였다. 최근 중력식 육상 기초에 대한 연구로는 하중 및 지반 물성의 공간적 불확실성을 고려한 신뢰성 해석 연구가 수행된바 있다(Vahdatirad et

Received 21 November 2014, revised 23 September 2015, accepted 22 October 2015

Corresponding author Dong-Hyawn Kim: +82-63-469-1862, Welcomed@naver.com

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KUUV spring conference 2015 in Daejeon.

al., 2014).

이에 본 연구에서는 중력식 해상풍력 기초에 대해 해양 환경하중 및 지반정수의 확률 변동성을 고려한 신뢰성 해석을 수행하였다. Det Norske Veritas(DNV) 기준에 의해 지지력 및 활동에 의한 파괴모드를 한계상태함수로 정의하였으며(DNV, 2013), 수치해석에 이용된 기초구조물은 벨기에 연안에 설치된 Thornton bank project의 모델을 참조하였다(Peire et al., 2009). 파랑 및 풍하중의 확률특성은 수치해석을 통해 구한 시간이력 응답과 Peak over threshold (POT) 방법을 사용하여 확률분포함수를 추정하였다(Coles et al., 2001). Cheng의 연구에 따르면 시뮬레이션 시간 10분을 하나의 셋트로 구성하고 셋트를 증가시키면서 해석을 수행한 결과 20셋트 전후로 추정된 확률분포함수의 모수가 수렴되는 결과를 보였으므로 이를 근거로 본 연구에서는 풍하중과 파랑하중 생성시 각 각 20, 50set를 생성하여 해석을 수행하였다(Cheng, 2002). 그리고 지반의 확률분포는 DNV 기준에서 제안하는 Beta 분포로 취급하였으며(DNV, 2012), 변동성은 국내 서남해안 지반조사 결과를 참조하여 확률분포 특성에 반영하였다. 신뢰성 해석은 한계상태함수를 선형 근사하여 신뢰도 지수를 산정하고 간접적으로 파괴확률을 산정하는 방법인 Level II 수준의 일계신뢰도법(First order reliability method, FORM)을 사용하였으며(Hasofer and Lind, 1974), 각 파괴모드별 신뢰도지수 및 확률변수로 취급된 설계변수들에 대한 민감도계수 및 최확 파괴점(Most probable failure point, MPFP)을 산정하였다.

2. 중력식 기초의 파괴모드

중력식 해상풍력 기초는 지지력, 활동에 의한 파괴 그리고 지반 강성에 따른 장·단기 변형이 주된 파괴모드로 고려된다(DNV, 2013; API, 2007). 본 연구에서는 기초의 지지력 및 활동에 의한 파괴모드를 한계상태함수로 정의하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

2.1 지지력

DNV에서는 Fig. 1과 같이 풍력터빈에 작용하는 수직(V) 및 수평방향(H)의 하중을 기초와 지반의 접촉면에서 작용하는 하

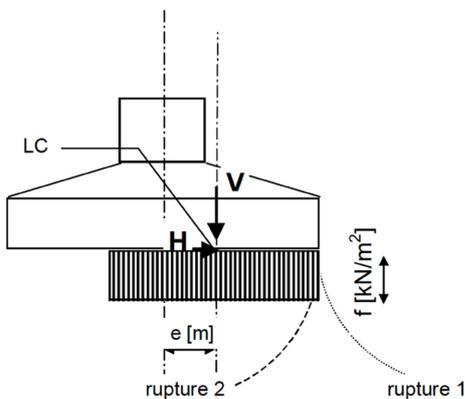


Fig. 1 Loading under idealized conditions (DNV, 2013)

중으로 환산하여 허용 지지력을 산정하게 되며, 파괴 형태에 따라 Rupture 1, Rupture 2로 구분된다.

배수조건에서 지지력에 대한 검토는 Fig. 1에서 Rupture 1 과 같은 파괴형태를 보이므로 식 (1)에 의해 계산할 수 있으며,

$$q_{d1} = \frac{1}{2} \gamma' b_{eff} N_r s_r i_r + p'_0 N_q s_q i_q + c_d N_c s_c i_c \quad (1)$$

편심하중이 심할 경우 즉, 편심거리가 기초폭의 30%를 넘는 경우($e > 0.3b$) Rupture 2에 해당하므로 식 (2)를 따른다.

$$q_{d2} = \gamma' b_{eff} N_r s_r i_r + c_d N_c s_c i_c (1.05 + \tan^3 \phi) \quad \text{for } e > 0.3b \quad (2)$$

여기서, q_d : 설계 지지력 [kN/m²]

b_{eff} : 유효 폭 [m]

γ' : 지반 유효단위중량 [kN/m³]

p'_0 : 유효 흙덮기압 [kN/m²]

c_d : 점착력 [kN/m²]

N_r, N_q, N_c : 지지력 계수 [-]

s_r, s_q, s_c : 형상 계수 [-]

i_r, i_q, i_c : 경사 계수 [-]

ϕ : 내부마찰각 [°]

수평 연직하중의 크기에 따라 기초와 지반이 접촉하는 유효 면적(A_{eff})은 Fig. 2에서 빗금친 타원형태의 면적에 해당하며, 식 (3)을 통해 계산할 수 있다.

$$A_{eff} = 2 \left[R^2 \arccos\left(\frac{e}{R}\right) - e \sqrt{R^2 - e^2} \right] \quad (3)$$

여기서, R은 기초의 반지름이고, e는 모멘트와 수직하중의 비 (M/V)로 편심거리이다.

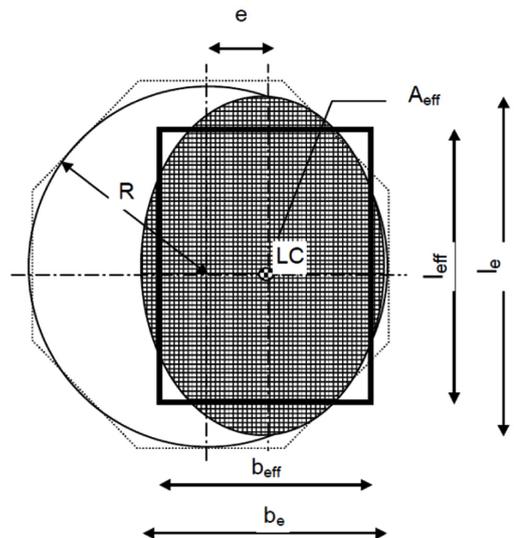


Fig. 2 Circular and octangular footings with effective foundation area marked out(DNV, 2013)

2.2 활동

수평하중을 받는 중력식 구조물이기 때문에 활동저항에 대한 검토가 필요하며 배수조건일 경우 식 (4)에 의해 활동에 대한 평가를 수행한다(DNV, 2013).

$$H < A_{eff}c + V \tan \phi \tag{4}$$

여기서, c 와 ϕ 는 각각 지반의 점착력과 내부 마찰각이다.

지반의 내부마찰각(ϕ)=0 일 경우 즉, 비배수 조건일 경우 식 (5)을 따르며,

$$H < A_{eff}c_{ud} \tag{5}$$

연직 및 수평방향 하중은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{V}{H} = 0.4 \tag{6}$$

3. 신뢰성 해석 이론

설계 변수의 불확실성을 합리적으로 고려하고 그에 따른 구조물의 정량적인 파괴확률을 산정하기 위해서는 신뢰성 해석이 필요하며, 본 연구에서는 구조물의 파괴 또는 손상을 판단할 수 있는 기준인 한계상태함수를 선형 근사하는 방법으로 신뢰도지수를 계산하고 파괴확률을 산정하는 Level II 방법인 일계신뢰도법(First order reliability method, FORM)을 사용하였다(Hasofer et al., 1974).

일계신뢰도법은 기본적으로 신뢰도지수 산정의 편의성을 위해 신뢰성 해석에 사용되는 확률변수를 평균(μ)과 표준편차(σ)를 이용하여 식 (7)과 같이 무차원 형태인 표준화 변수 또는 환산변수로 변환 할 수 있으며,

$$X'_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \tag{7}$$

표준화된 확률변수 공간상에 한계상태함수를 나타내면 Fig. 3과 같다.

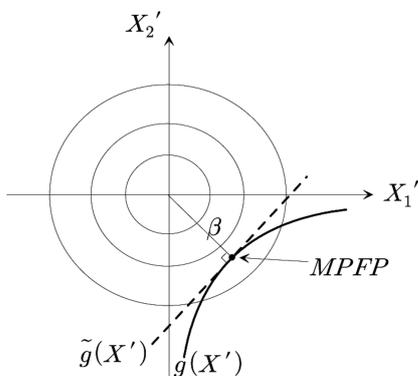


Fig. 3 Hasofer-Lind reliability index

여기서, $g(X')$ 는 표준화된 확률변수 공간에서의 한계상태함수이며, 신뢰도 지수(β)는 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리이므로 식 (8)과 같이 파괴면 까지 최단거리를 찾는 최적화 과정으로 볼 수 있다.

$$\text{Minimize } \beta = D = \sqrt{(X'^T X')} \tag{8}$$

$$\text{Subject to the constraint } g(X) = g(X') = 0$$

최종적으로 수립된 신뢰도지수는 표준화된 확률변수 공간상에서 산정된 것으로 파괴확률은 표준정규분포의 누적분포함수(Φ)를 이용하여 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \tag{9}$$

4. 수치해석

4.1 대상 모델 및 제원

해석에 이용된 해상풍력터빈은 벨기에 인근 해안 Thornton bank 해상풍력단지에서 설치된 구조물로 Fig. 4와 같이 로터 직경

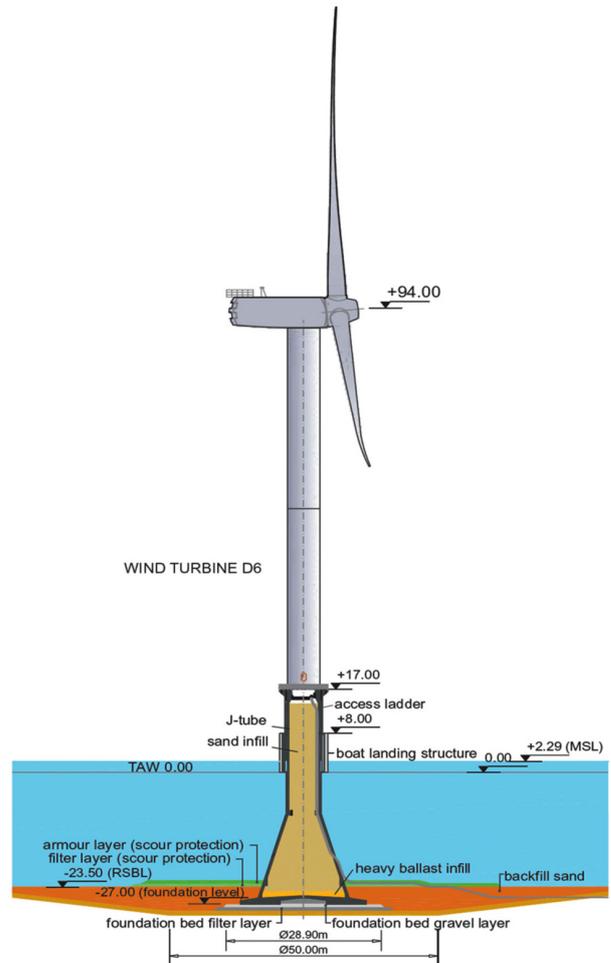


Fig. 4 Design lay-out of the gravity-based foundation (Peire et al., 2009)

Table 1 Super-structure and foundation characteristics

Turbine	Capacity	5 MW
	Rated wind speed	11.4 m/sec
	Hub height	94 m
	Rotor diameter	126 m
	Nacelle-rotor weight	4 MN
	Tower weight	3.5 MN
	Type	Gravity type
Base	Diameter	23.5 m
	Weight (Caisson, Fill)	70 MN

126m, 허브 높이는 94m이며, 발전 용량은 5MW에 해당하는 중력식 기초 해상풍력 구조물이다.

상부 터빈의 제원은 National Renewable Energy Laboratory (NREL) 5MW 풍력터빈의 제원을 참조 하였으며(Jonkman et al., 2009), 대상 구조물에 대한 세부 정보는 Table 1과 같다 (Peire et al., 2009).

4.2 해양환경하중의 확률 분석

파랑 및 풍하중의 변동성에 대한 확률분포를 추정하기 위해 Peak over threshold (POT) 방법을 사용하였다. POT 방법은 분포의 꼬리부분에 대한 통계적 이론으로 미리 정의된 특정 임계치(Threshold)를 초과하는 값들에 대해 극치 분포를 추정하는 방법이다. 임계치는 IEC(International Electornical Committee)-61400 기준에서 제안하는 방법을 사용하였으며, 평균과 표준편차를 사용하여 식 (10)과 같이 산정할 수 있다(IEC, 2005).

$$Threshold = \mu + 1.4\sigma \tag{10}$$

풍력 터빈은 풍속이 증가함에 따라 로터(Rotor)의 분당 회전수는 증가하며, 정격 로터 스피드에 도달할 경우 피치(Pitch) 제어를 통해 로터의 회전수를 일정하게 유지시키게 된다. 그러므로

Table 2 Turbulent wind field definition

Mean wind speed	11.4 m/sec
Duration time (1set)	600 sec
Turbulence intensity	0.16
Spectrum type	von Karman
Design situation	Power production

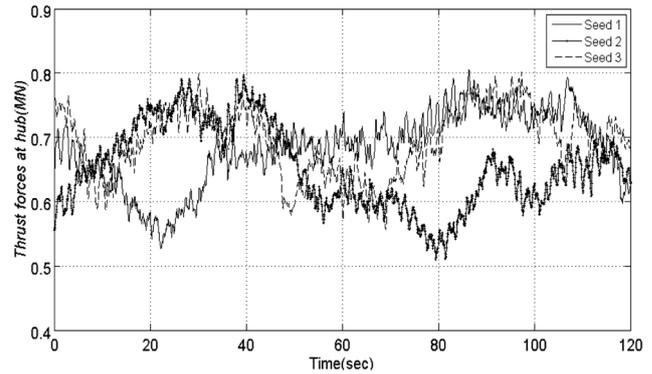
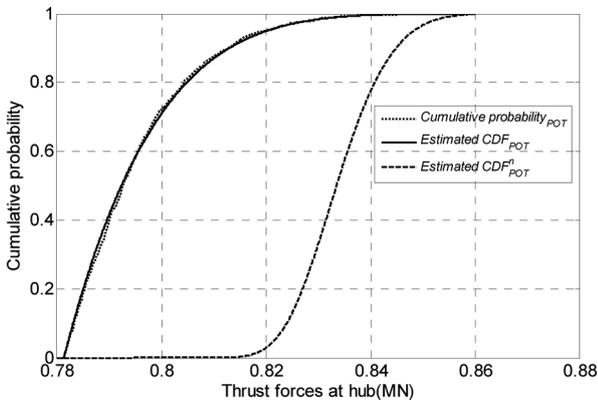


Fig. 5 Thrust force time history

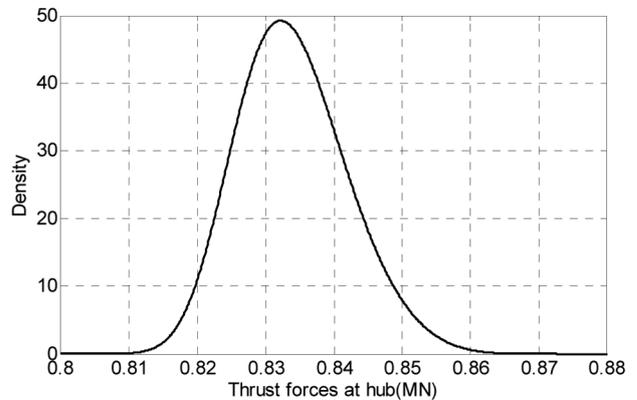
정격풍속에 해당하는 풍속이 작용할 때 가장 큰 추력이 작용한다고 볼 수 있기 때문에 Table 2와 같은 조건을 사용하여 난류 시드 (Turbulence seed)에 따라 20set의 바람장을 생성하였다.

GH_blated 소프트웨어를 사용하여 바람장 생성 및 난류해석을 수행하였으며, 계산된 추력은 Fig. 5와 같다(GH, 2013).

추력의 피크응답에 대한 확률분포 함수는 POT 방법을 사용하여 추정하였다. 식 (10)을 통해 임계값을 계산할 수 있으며, 임계값을 초과하는 피크응답을 샘플링하여 누적확률로 나타내면 Fig. 6(a)의 점선과 같다. Fig. 6(a) 파선은 피크응답의 누적분포함수에 n 승을 함으로써 계산된다. 여기서, n 은 각 셋트별 임계값을 초과하는 값의 평균 개수이다. 추정된 확률분포함수의 형태는 Weibull 분포이며, Shape(k), Scale(σ), Location(μ)



(a) CDF



(b) PDF

Fig. 6 Estimated distribution of peak response for thrust force

parameter는 각각 -0.1813, 0.0076, 0.8307이다.

해수면 위치에서 구조물의 직경(6.5m)과 파장(214.77m)의 비는 약 0.03 이므로 파력은 모리슨 방정식에 의해 계산되었다. 정지된 강체 원통부재일 경우 파력(F_w)은 항력과 관성력의 합력으로 식 (11)과 같이 표현할 수 있다(Morison et al., 1950).

$$F_w = C_D \frac{1}{2} \rho_w D |u| u + C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (11)$$

여기서, u 와 $\frac{\partial u}{\partial t}$ 는 물 입자의 속도(조류속 포함) 및 가속도, C_D 과 C_M 는 항력과 관성력 계수, D 는 파일의 직경 그리고 ρ_w 는 해수단위중량이다. 파랑하중 계산에 사용된 불규칙 파는 유의 파고 7.4m, 피크주기는 15.19sec로 Table 3과 같은 조건으로 생성하였다.

Table 3 Irregular wave definition

Significant Wave Height	7.4 m
Peak period	15.19 sec
Peakdness	3.3
Current speed	1.182 m/sec
Duration time(1set)	600 sec
Spectrum type	Jonswap

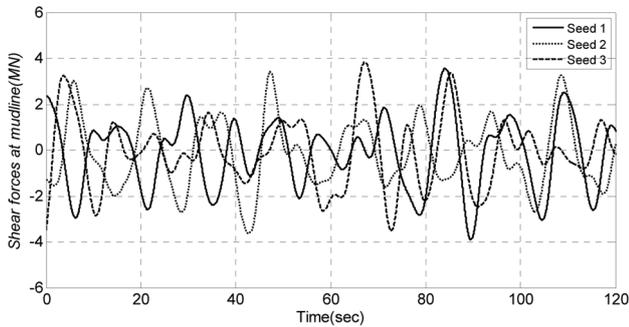


Fig. 7 Shear force time history

불규칙 파랑으로 인한 하중의 확률적 변동성을 고려하기 위해 Random seed에 따라 50set의 불규칙 파랑을 생성하고 수치 해석을 통해 중력식 기초와 지반의 접촉면에서의 전단력과 모멘트를 계산하였다. Fig. 7은 전단력의 시간이력 응답을 나타낸 것이며, seed에 따라 모두 다른 불규칙 파랑이 생성되어 작용하기 때문에 그 응답 또한 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

전단력의 시간이력 응답에 대해 POT 방법을 사용하여 Fig. 8과 같이 누적분포함수를 추정하였다. 추정된 확률분포함수의 형태는 Weibull 분포이며, Shpae(k), Scale(σ), Location(μ) parameter 는 각각 -0.0839, 0.5844, 5.4725로 확률밀도함수로 나타내면 Fig. 8과 같다.

수평력과 모멘트의 상관관계를 신뢰성해석에 반영하기 위해 Fig. 9와 같이 수평력과 모멘트의 관계를 분석하였으며, 회귀식의 형태는 식 (12)과 같다.

$$M(H) = aH^b \quad (12)$$

여기서, M 은 파랑하중에 의해 기초와 지반의 접촉면에서 발생하는 모멘트($MN \cdot m$)이며, H 는 수평력(MN)이다. 식 (12)의 a , b 는 회귀분석을 통해 Table 4와 같이 추정되었다.

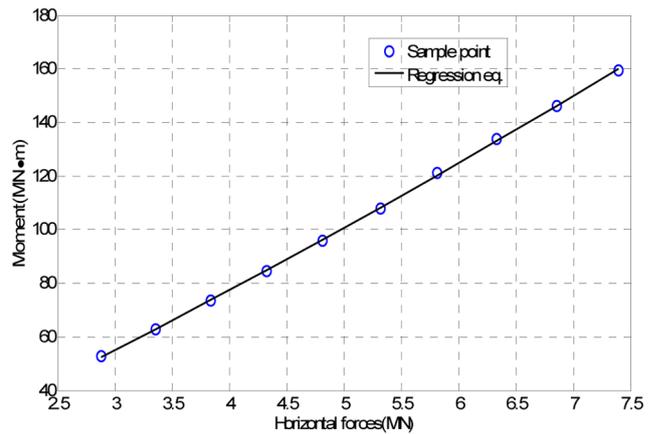


Fig. 9 Relationship of horizontal wave force and moment

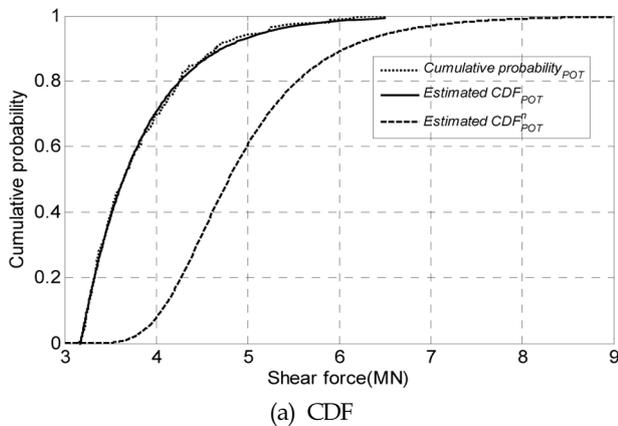


Fig. 8 Estimated distribution of peak response for shear force at mudline

Table 4 Results of regression analysis

Symbol	Value	Goodness of fit
<i>a</i>	14.99	SSE : 1.813 R-square : 0.9998
<i>b</i>	1.184	RMSE : 0.4761

4.3 확률변수

기초와 접하는 해저면 지층의 단위중량 및 내부마찰각의 평균은 19kN, 35°로 가정하였다. 토질정수의 확률변동성은 서남해안 지반조사 결과 단위중량과 내부마찰각은 각각 2~14%, 3~10%의 범위로 나타나고 있어 해당 범위 내에서 5%와 8%로 가정하였다. 대부분의 지반정수 범위는 음수가 아닌 특정 범위를 갖고 있으며, 일반적으로 대수정규분포가 사용되고 있다. 그러나 DNV에서는 토질 정수에 대해 하한과 상한이 정해져 있는 Beta 분포를 권장하고 있기 때문에 Beta 분포로 취급하였다 (DNV, 2012). 신뢰성 해석에 사용된 수직하중의 확률특성(Kisse and Lesny, 2007) 및 POT 방법에 의해 추정된 수평하중, 그리고 지반정수에 대한 확률변수를 Table 5에 정리하였다.

4.4 신뢰성 해석 및 분석

한계상태함수는 지지력 및 활동에 대해 정의 하였으며, 지지력 파괴에 대한 한계상태함수는 지반의 지지력(q_u)과 연직력(V)에 대한 함수로 식 (13)와 같이 표현할 수 있다. 지반의 지지력은 연직력과 모멘트의 크기에 따라 식 (1), (2)와 같이 Rupture 1과 2로 구분되므로 한계상태 함수는 신뢰성 해석 과정에서 갱신되는 파괴점에 따라 변동된다.

$$g_1 = q_u A_{eff} - V \tag{13}$$

활동 파괴의 경우 배수조건의 모래지반으로 가정하였기 때문에 한계상태함수는 식 (14)와 같이 구성 할 수 있다.

$$g_2 = A_{eff} c + V \tan \phi - H \tag{14}$$

각 파괴모드별 정의된 한계상태함수에 따라 중력식 해상풍력 기초에 대해 신뢰성 해석을 수행하였으며, 그 결과 각 설계변수별 민감도 계수(α) 및 파괴점(MPFP) 그리고 파괴 모드별 신뢰도 지수는 Table 6과 같다.

파괴에 미치는 영향을 판단할 수 있는 민감도 계수를 살펴보

면 두 파괴모드 모두 연직 하중이 가장 주요한 설계변수로 나타났고, 그 다음으로 파력인 것으로 나타났다. 자중에 의해 외력에 저항하는 중력식 기초 구조물의 특성상 연직하중이 파괴를 유발하는 가장 지배적인 설계요소로 나타난 것이며, 다른 설계변수에 비해 상대적으로 매우 큰 민감도를 갖는 이유는 Table 5에서 알 수 있듯이 변동계수가 0.15(15%)로 가장 큰 영향으로 판단된다. 또, 풍하중은 파괴에 미치는 영향이 가장 작은 것으로 나타났으며, 그 이유는 풍력 터빈에 정격 풍속 이상의 풍속이 작용할 경우 Pitch control을 통해 로터의 RPM을 제어하기 때문에 추력은 더 이상 증가하지 않고 감소하기 때문으로 판단된다.

그리고 DNV 기준에서는 Table 7과 같이 수준별 목표 신뢰도 지수를 제시하고 있으며, 신뢰성 해석을 통해 산정된 신뢰도 지수를 이와 비교했을 때 모든 수준별 목표 신뢰도 지수를 상회하는 것으로 나타났다.

Table 6 Result for reliability analysis using FORM

Random variable	Bearing capacity failure		Sliding failure	
	α	MPFP	α	MPFP
γ	0.0054	18.9750		
ϕ	0.0026	34.9746	0.0061	34.9312
V	0.9846	21.4148	0.9958	9.8682
H_{wave}	-0.1745	6.3071	-0.0918	6.0587
H_{wind}	-0.0080	0.8337	-0.0010	0.8335
Reliability index, β	4.8999		5.8426	

Table 7 Values of acceptable annual target reliability index

Class of failure	Less Serious consequence	Serious consequence
I. Redundant structure	3.09	3.71
II. Significant warning prior to occurrence of failure in a non-redundant structure	3.71	4.26
III. No warning before the occurrence of failure in a non-redundant structure	4.26	4.75

Table 5 Characteristics of random variables

Random variable	Symbol	Mean	COV	Distribution
Unit weight of sand [kN/m ³]	γ	19.0 kN/m ³	0.05	Normal
Internal friction angle of sand [deg]	ϕ	35°	0.08	Beta
Vertical load [MN]	V	77.5 MN	0.15	Normal
Horizontal load [MN]	Wind	H_{wind}	$k = -0.1813, \sigma = 0.0076, \mu = 0.8307$	Weibull
	Wave	H_{wave}	$k = -0.0839, \sigma = 0.5844, \mu = 5.4725$	

5. 결 론

본 연구에서는 중력식 해상풍력 기초에 대해 해양 환경하중 및 지반정수의 확률적 변동성을 고려하여 신뢰성 해석을 수행하였다. 중력식 기초에 대한 한계상태함수는 DNV에 근거하여 정의되었으며, 지반정수의 국내 서남해안 지반조사 결과를 참조하여 변동계수를 결정하고 상한과 하한이 정해져 있는 Beta 분포로 취급하였다. 기초 구조물에 작용하는 수평력인 파랑 및 풍하중의 확률적 변동성을 고려하기 위해 각 하중별 수치해석을 수행하여 시간이력 응답을 계산하였다. 파랑 및 풍하중의 확률분포함수는 POT방법에 의해 계산된 시간이력 응답을 분석함으로써 정의되었다. 비록 풍속과 파고의 상관관계 즉, 풍하중과 파랑하중을 결합된 확률분포함수로 취급하지 못했다는 제한사항이 존재하지만 지반 물성의 불확실성뿐만 아니라 풍하중 및 파랑하중의 확률적 특성을 실제 구조해석을 통해 계산된 응답으로 추정하여 신뢰성 해석에 적용함으로써 중력식 해상풍력 기초 구조물에 대해 합리적인 신뢰성 해석 방법을 제안하였다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 20143010024330, 실규모 해상풍력 터빈을 탑재한 석션버켓 지지구조 실증연구)

References

- American Petroleum Institute (API), 2007. Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. API Recommended Practice 2A-WSD(RP 2A-WSD).
- Carswell, W., Arwade, S.R., DeGroot, D.J., Lackner, M.A., 2014. Soil-structure Reliability of Offshore Wind Turbine Monopile Foundations. Wind Energy.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., Dorazio, P., 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values (Vol. 208). London: Springer.
- Cossa, N.J., Potty, N.S., Liew, M.S., Idrus, A.B., 2011. Reliability Analysis of Tubular Joints of Offshore Platforms in Malaysia, World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 838-844.
- Cheng P. W., 2002. A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines. PhD Thesis. Delft University of Technology.
- Garrad Hassan (GH), 2013. Bladed User Manual. Garrad Hassan and Partners Limited Document.
- Det Norske Veritas (DNV), 2013. Offshore Standard DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures. Det Norske Veritas AS.
- Det Norske Veritas (DNV), 2012. Recommended Practice DNV-RP-C207: Statistical Representation of Soil Data. Det Norske Veritas AS.
- Hasofer, A.M., Lind, N.C., 1974. Exact and Invariant Second-Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 100(1), 111-121.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2005. IEC 61400-1: Wind Turbines-Part 1: Design Requirements. Edition 3, Switzerland, IEC
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. NREL/TP-500-38060, NREL: Golden CO.
- Kisse, A., Lesny, K., 2007. Reliability-Based Design of the Foundation of an Offshore Wind Energy Converter Using the Single Surface Hardening Model. Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Tokyo, Japan, 129-136.
- Kirkegaard, P.H., Enevoldsen, I., Sorensen, J.D., Brincker, R., 1990. Reliability Analysis of a Mono-tower Platform. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 112(3), 237-243.
- Lee, J.H., Kim, M.H., Shin, S.C., Lee, Y.S., 2014. Design Optimization and Reliability Analysis of Jacket Support Structure for 5-MW Offshore Wind Turbine. Journal of Ocean Engineering and Technology, 28(3), 218-226.
- Morison, J.R., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The Force Exerted by Surface Waves On Piles. Journal of Petroleum Technology, 2(05), 149-154.
- Peire, K., Nonneman, H., Bosschem, E., 2009. Gravity Base Foundations for the Thornton Bank Offshore Wind Farm. Terra et Aqua, 115, 19-29.
- Vahdatirad, M.J., Griffiths, D.V., Andersen, L.V., Sørensen, J.D., Fenton, G.A., 2014. Reliability Analysis of a Gravity-based Foundation for Wind Turbines: a Code-based Design Assessment. Journal of Geotechnique, 64(8), 635-645.