

극한 해양 환경하중을 고려한 해상풍력터빈 지지구조물의 신뢰성 해석 Reliability Analysis Offshore Wind Turbine Support Structure Under Extreme Ocean Environmental Loads

이상근* · 김동현**
Sang Geun Lee* and Dong Hyawn Kim**

요 지 : 극한 해양 환경하중을 고려한 해상풍력터빈 지지구조물에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 신뢰성 해석을 위한 한계상태함수는 mud-line에서 지지구조물의 동적응답으로 정의되며, 동적응답은 정적응답과 동적응답계수의 곱으로 정의된다. 동적응답계수는 설계조건에서의 동적 시간이력응답을 분석하여 구할 수 있다. 허브(Hub) 위치에 작용하는 추력은 GH_Bladed를 사용하여 계산하였으며, 정적하중으로 적용하였다. 동적응답계수는 대수정규분포, 지반물성 중 내부마찰각은 상한과 하한이 결정된 베타분포이며, 그 외 설계변수는 정규분포 확률변수로 취급되었다. mud-line 에서의 동적응답을 통해 정의된 한계상태함수에 따라 일계신뢰도법(First order reliability method, FORM)을 사용하여 해상풍력터빈 지지구조물의 신뢰도지수를 산정하였다.

핵심용어 : 해상풍력터빈, 파랑하중, 풍하중, 신뢰성, 파괴확률, 한계상태함수, 지지구조물, 재킷, 일계신뢰도법, 응답면 기법

Abstract : Reliability analysis of jacket type offshore wind turbine (OWT) support structure under extreme ocean environmental loads was performed. Limit state function (LSF) of OWT support structure is defined by using structural dynamic response at mud-line. Then, the dynamic response is expressed as the static response multiplied by dynamic response factor (DRF). Probabilistic distribution of DRF is found from response time history under design significant wave load. Band limited beta distribution is used for internal friction angle of ground soil. Wind load is obtained in the form of thrust force from commercial code called GH_Bladed and then, applied to tower hub as random load. In a numerical example, the response surface method (RSM) is used to express LSF of jacket type support structure for 5MW OWT. Reliability index is found using first order reliability method (FORM).

Keywords : Offshore Wind Turbine, Wave Load, Wind Load, Reliability, Failure Probability, Limit State Function, Support Structure, Jacket, Foundation, First Order Reliability Method(FORM), Response Surface Method(RSM)

1. 서 론

해상풍력터빈 지지구조물의 형태는 다양하지만 그 중 시공 사례가 많아 비교적 경험적인 지식이 풍부한 재킷(Jacket) 또는 모노파일(Monopile) 형식이 주를 이룬다. 이러한 지지구조물은 지반에 의해 지지력을 발휘하기 때문에 지반물성의 변동성이 구조물 안정성에 영향을 미치는 가장 큰 요인 중 하나이다. 그러나 지반물성은 다른 설계변수에 비해 불확실성이 매우 큰 요소이며, 기본적으로 불규칙적인 파랑 및 풍하중이 작용하기 때문에 해상풍력터빈 지지구조물의 안전성 확보를 위한 설계를 위해서는 설계변수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 수행해야 한다.

신뢰성 해석시 구조물의 한계상태함수가 정적응답에 의해 정의된다면 비교적 간단하게 신뢰도지수를 산정할 수 있지만, 해상풍력터빈 지지구조물의 경우 기본적으로 동적하중이 작용하며, 비선형 거동을 하는 지반과 연동되어 있기 때문에 보다 정확한 파괴확률 산정을 위해서는 동적응답을 고려한 한계상태함수를 정의해야 한다. 그러나 동적 구조해석은 정적 해석에 비해 상당한 해석시간을 필요로 하며, 응답면 추정 및 신뢰성해석 과정에서 반복적으로 해석을 수행해야 하기 때문에 적용이 어렵다.

기존 동적 구조해석기반의 신뢰성해석은 피크응답에 대한 극치분포를 추정함에 있어 해석시간을 단축하기 위한 방법들을 제안하였다. Cheng(2002)은 구조물 동적 피크응답에 대한

*군산대학교 해양산업공학과(Dept of Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Miryongdong, Kunsan 573-701, Korea, sg5579@naver.com)

**군산대학교 해양공학부(Corresponding author : Dong Hyawn Kim, Dept of Ocean Engineering, Kunsan National University, Miryongdong, Kunsan 573-701, Korea, Tel: +82-63-469-1862, Fax: +82-63-7449, welcomed@naver.com)

확률분포 추정을 위해 Peak-Over-Threshold(POT) 방법을 사용하였으며, 시뮬레이션 시간을 증가시키면서 추정된 확률분포 함수 모수의 수렴 정도를 판단하여 최소한의 시뮬레이션 시간을 결정하였다. Agarwal(2008)도 같은 방법으로 접근하였으나, 피크응답에 대한 확률분포 추정을 위해 POT 및 Block maxima 방법 두 가지를 사용하였다. 그러나 두 연구 모두 파랑과 풍속만을 고려하여 신뢰성 해석을 수행하였고, 지지구조물과 연동된 지반물성의 변동성은 고려되지 않았다.

이에 본 연구에서는 해상풍력터빈 지지구조물 신뢰성 해석 시 새로운 접근 방법을 제안하였다. 동적 피크응답의 분포를 정적 응답으로 정규화 하여 새로운 확률변수인 동적응답계수를 도입하였으며, 동적응답은 동적응답계수와 정적응답의 곱으로 정의되기 때문에 동적구조해석의 가장 큰 제한사항인 해석시간 문제를 해결하였다. 신뢰성 해석시 Level II 방법인 일계신뢰도법(First order reliability method, FORM)을 사용하였으며(Hasofer et al.,1974), 파랑 및 풍속중 그리고 지반물성의 변동성을 고려한 5-MW 해상풍력터빈 재킷(Jacket) 지지구조물에 대한 파괴확률을 산정하였다.

2. 지지구조물의 신뢰성 해석

2.1 극치응답비를 이용한 신뢰성 해석

지지구조물의 동적 응답은 지지구조물의 역학적 특성, 지반물성 그리고 설계하중 등의 설계변수에 의해 결정되며, 신뢰성 해석을 위한 지지구조물의 한계상태방정식은 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$g = R_{all} - R_p(X) \tag{1}$$

여기서, R_{all} 은 구조물 응답에 대한 허용치, $R_p(X)$ 는 설계변수에 의한 지지구조물의 동적 피크응답이며 일반적인 확률밀도 함수 형태는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 R_p 는 지지구조물의 피크응답을 의미한다. 그러나 지반의 강성, 풍속 등 설계변수(X)에 의해 R_p 의 확률밀도 함수는 달라지며, X 에 따른 확률밀도 함수는 Fig. 2와 같다.

따라서, R_p 와 X 의 결합 확률밀도 함수는 식(2)와 같이 정의될 수 있다.

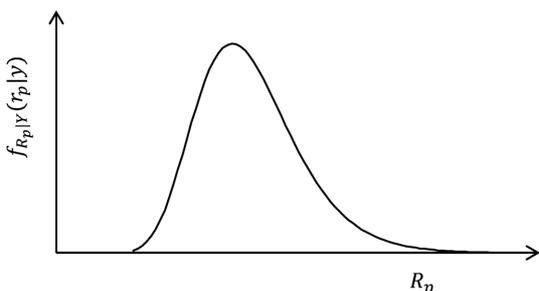


Fig. 1. A typical probability density function of peak response.

$$f_{R_p, X}(r_p, X) = f_{R_p|X}(r_p|X) f_X(X) \tag{2}$$

Fig. 3은 확률밀도 함수 $f_{R_p, X}(r_p, X)$ 를 나타낸 것이며, 빗금 친 영역은 한계상태함수가 음수가 되는 부분으로 파괴영역에 해당하기 때문에 파괴확률은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_f = \int_{g < 0} f_{R_p, X}(r_p, X) dr_p dx = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{R_{all}}^{\infty} f_{R_p|X}(r_p|X) f_X(X) (dr_p) dx \tag{3}$$

위 조건에서 파괴확률 계산을 위해 확률변수로 고려되는 설계변수(X)에 따른 동적 피크응답을 구해야 하지만, 반복적인 동적 구조해석을 수행해야 하므로 어려움이 따른다. 이에 파괴확률(P_f)을 쉽게 구할 수 있도록 식(4)와 같이 동적응답계수 R_n 을 정의하였다.

$$R_n = R_p / R_{st} \tag{4}$$

여기서, R_{st} 는 설계조건에서의 정적응답이며, 지반물성 및 파랑, 풍속중 등에 대한 종속변수이다. 설계변수의 변동성에 따른 지지구조물의 동적 특성 변화가 크지 않은 경우 동적 피크응답과 정적응답은 비례할 수 있다는 가정에 식(4)의 개념을 적용하면, 한계상태함수는 식(5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$g(X) = R_{all} - R_n R_{st}(X) \tag{5}$$

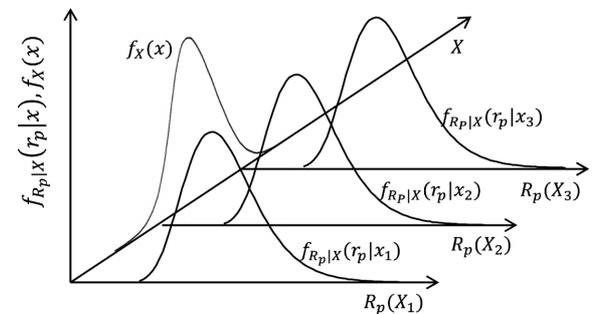


Fig. 2. PDFs of R_p for different X 's .

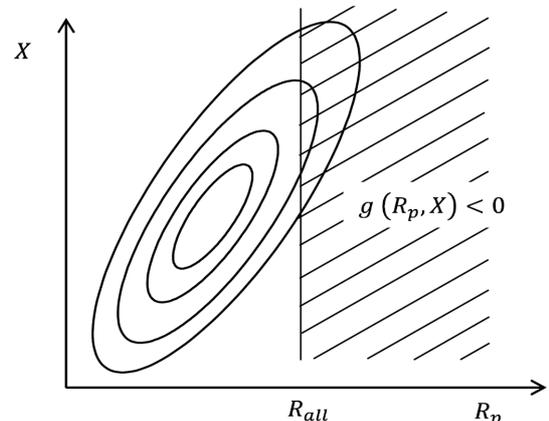


Fig. 3. Contour plot for $f_{R_p, X}(r_p, X)$.

R_n 과 X' 의 결합된 확률밀도함수를 표준정규분포 확률변수 공간에 도시하면 Fig. 4와 같다.

표준정규분포 확률변수의 공간에서 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리인 신뢰도지수를 산정하는 일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 통해 파괴확률을 계산할 수 있다. GH_Blated를 통해 추력을 계산하고 정적/동적 구조해석 결과를 이용한 신뢰성해석 과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 5와 같다.

실제 구조물을 대상으로한 동적 구조해석에는 과도한 해석 시간이 소요되므로 검증을 위한 모델은 1자유도계 시스템으로 가정하였으며, 질량(M) 1095.156 ton, 강성(K) 3.059 MN/m, 감쇠비(ζ)는 1%로 5MW 해상풍력터빈의 1차 고유진동수에 맞춰 모델링 하였다. 동적해석에 사용된 불규칙 파는 유의파고 7.9 m, 피크주기 15.19 sec로 Jonswap spectrum을 통해 생성하였으며, 모리슨 방정식(Morison et al., 1950)을 사용하여

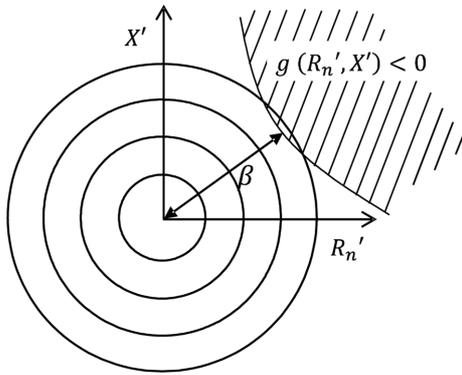


Fig. 4. Contour plot for $f_{R_n', X'}(r_n', x')$.

계산하였다. 해석에 사용된 확률변수는 강성(K)과 동적응답 계수(R_n)로 Table 1과 같다.

Monte Carlo Simulation(MCS) 및 FORM을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였으며, 각 한계상태 함수는 허용변위 (0.038m)기준으로 식(6), (7)와 같이 정의하였다.

$$g_{FORM} = 0.038 - R_n R_{st} \quad (6)$$

$$g_{MCS} = 0.038 - R_p \quad (7)$$

신뢰성 해석을 통해 계산된 파괴확률은 Table 2와 같고, 파괴확률의 절대오차는 0.067%로 허용 가능한 오차라고 판단된다.

2.2 동적 피크응답에 대한 분포 추정

지지구조물의 동적 피크응답의 분포함수는 파랑 및 풍하중 등에 의한 동적응답을 분석함으로써 구할 수 있으며, 동적응답으로부터 피크응답의 분포를 추정하는 방법으로는 Block

Table 1. Distribution of random variables

Random variable	Value	Distribution
Stiffness, K	mean = 3.059, COV = 0.1	Normal
Dynamic response factor, R_n	Scale parameter = 0.8033 Shape parameter = 2.8279	Weibull

Table 2. Reliability analysis results

Method	Reliability index, β	Probability of failure
MCS	2.6139	0.00447(0.447%)
FORM	2.5463	0.00544(0.544%)

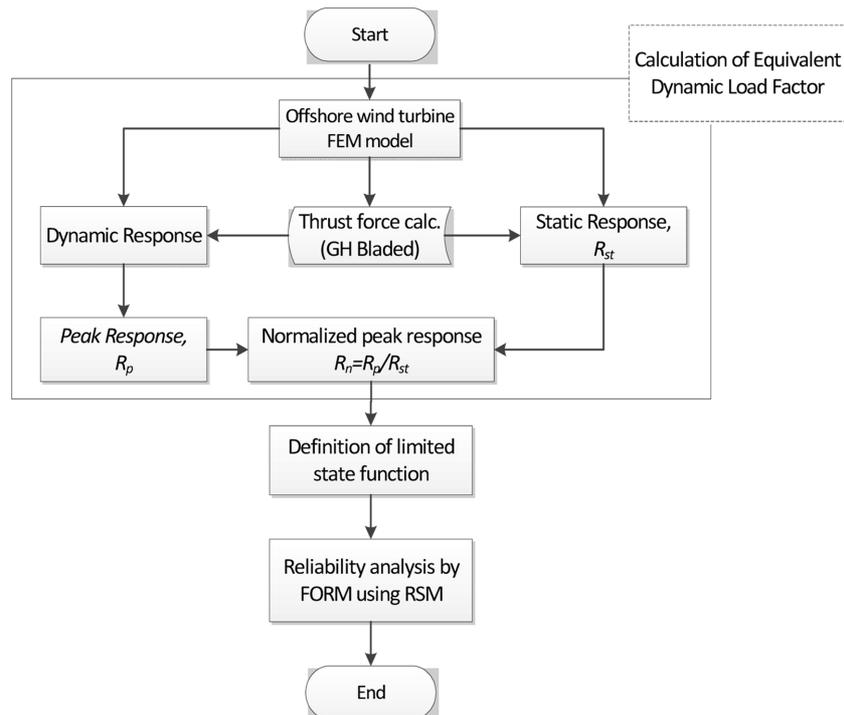


Fig. 5. Flowchart for reliability analysis.

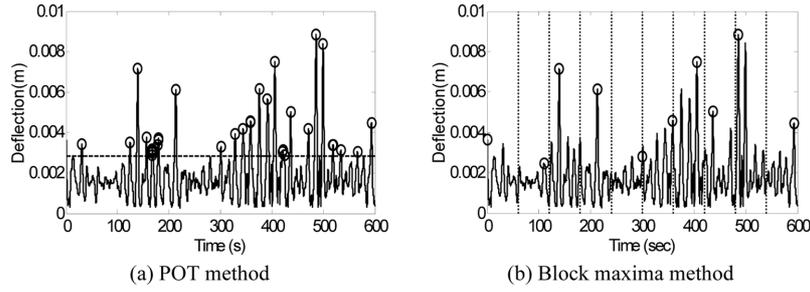


Fig. 6. Extreme value sampling.

maxima와 Peak-Over-Threshold(POT) 방법이 주로 사용되고 있다. Block maxima 방법은 시간이력응답을 일정 블록(Block) 크기로 분할하고 각 블록에서 최대값을 통해 분포함수를 추정하는 방법이며, POT 방법은 미리 정의된 임계값을 초과하는 모든 피크점을 가지고 분포함수를 추정하는 것이다. Block maxima와 POT 방법의 샘플링 예를 나타낸 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 Block maxima 방법에서는 block내부에서 하나의 최대값을 선택하기 때문에 다른 피크값들은 무시된다는 단점이 있지만 블록 크기를 줄임으로써 해결 할 수 있다. 그리고 POT 방법은 임계값에 따라 추정된 분포함수가 종속되기 때문에 임계값의 결정은 매우 중요한 요소이지만, 적절한 임계값을 구하는 것은 쉽지 않다는 제한사항이 있다.

2.3 피랑하중

지구조물에 작용하는 파력 계산시 모리슨 방정식(Morison et al., 1950)이 사용되었으며, 작용하는 하중으로 인한 부재의 거동을 고려할 경우 단위 길이당 작용하는 힘 f_w 는 식(8)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$f_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |U - \dot{r}| (U - \dot{r}) + C_M \rho_w A \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) \quad (8)$$

여기서, C_D , C_M 은 항력계수와 관성력계수, ρ_w 는 해수의 밀도, D 는 해양부착생물을 포함한 부재의 유효직경, A 는 수직축에 투영된 부재 단면적, U 는 부재축 직각방향의 물 입자 속도 성분이다. 식(8)을 통한 정적 피랑하중 계산시 물 입자의 속도를 부재 거동에 대한 상대속도로 고려하기 위해 고려된 부재의 속도성분인 \dot{r} 는 무시된다. 그리고 물 입자 운동에 대한 위상(Phase)은 선형 피랑이론에 근거하여 Sine과 Cosine 함수로 정의되며, 파력이 최대가 되는 위상은 식(9),(10)과 같다.

$$\sin \theta_0 = \pm \frac{\pi D C_M}{H C_D} \frac{2 \sinh^2(ks)}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (9)$$

$$\cos \theta_0 = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \theta_0} \quad (10)$$

2.4 모래지반에 대한 P-y 곡선

지반의 모델링은 구조물과의 상호작용을 고려하기 위해 비선형 스프링으로 모델링 하였다. 모래지반에서 구조물 변위와 지반반력의 비선형 관계를 정의하는 P-y 곡선은 API에서

제시한 방법에 따라 계산하였다(API RP 2A-WSD, 2007).

$$p_u = \min \begin{cases} p_{us} = (C_1 \chi + C_2 D) p_o' \\ p_{ud} = C_3 D p_o' \end{cases} \quad (11)$$

여기서, p_u 는 지반의 극한지지력, s 와 d 는 각각 얇은 기초와 깊은 기초, C_1 는 모래지반의 내부마찰각에 의해 결정되는 계수, D 는 기초 파일의 직경, χ 는 해저면을 기준으로 한 깊이, p_o' 는 유효 흙덮기압이며, 비선형 P-y 관계는 API기준에 따라 식(12)과 같이 정의된다.

$$P = A p_u \tanh \left[\frac{k_y}{A p_u} y \right] \quad (12)$$

여기서, A 는 동적 또는 정적하중 계수, k 는 초기 지반반력계수, y 는 수평 변위이다.

2.5 응답면 기법(Response surface method, RSM)

신뢰도 지수 산정을 위해서는 설계변수에 의해 정의되는 한계상태함수가 양함수로 표현 가능한 형태여야 한다. 그러나 한계상태함수가 식(5)와 같이 설계변수에 의해 종속되는 음함수로 존재하는 경우 Scheuller et al.(1987)에 의해 제안된 응답면 기법을 사용하여 한계상태함수를 양함수로 근사화 할 수 있다. 응답면은 표본점 선정 후 각 표본점에서의 구조해석을 통해 구할 수 있으며, 표본점 선정은 식(13)과 같이 확률변수의 평균 또는 중심으로부터 일정 거리만큼 떨어져 있는 점을 취하는 방법을 사용하였다(Khuri and Cornell, 1996).

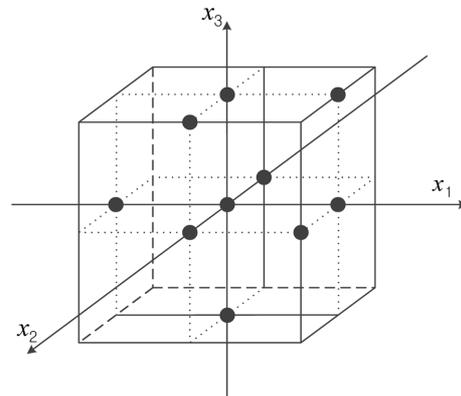


Fig. 7. Saturated design using full second order polynomial with cross terms.

$$X = X_i^c \pm h_i \sigma_{X_i} I_i \quad (13)$$

여기서, X_i^c 는 확률변수의 평균 또는 중심이 되는 점으로 매 회 갱신되는 파괴점, σ_{X_i} 는 X_i 의 표준편차, h_i 는 확장폭 그리고 I_i scattering index 이며, Saturated Design 에 의한 구조해석점을 정규화된 공간에 도시하면 Fig. 7과 같다.

3. 수치해석

3.1 지지구조물 및 지반조건

수치해석은 5-MW급 해상풍력터빈을 대상으로 하였으며, 지지구조물은 Fig. 8과 같이 서남해안의 풍속, 수심 및 파고 등을 고려하여 설계된 4-Leg 재킷(Jacket) 구조로 Pin pile을 삽입하여 암반과 그라우팅되는 형태이다.

NREL 5-MW 해상풍력터빈 모델(Jonkman et. al., 2009)을 참조하였으며, 로터(Rotor)와 너셀(Nacelle), 타워(Tower) 그리고 지지구조물의 질량은 각각 350 ton, 391 ton, 265 ton 이다. 지반은 Fig. 9와 같이 각각 다른 유효단위중량(γ) 및 내부마찰각(ϕ)을 갖는 다층 모래지반으로 구성하였고, 이

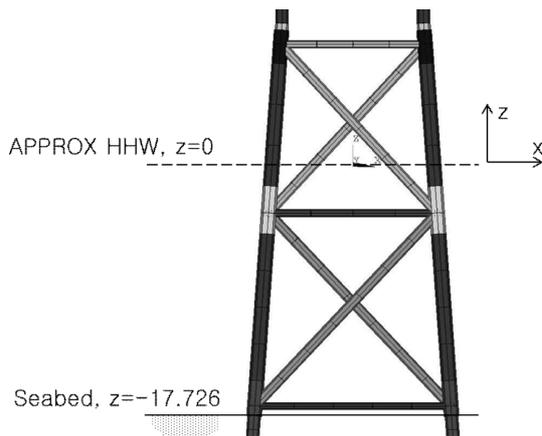


Fig. 8. Front view of jacket structure.

Sand 1 $\gamma_1 = 16 \text{ kN} / \text{m}^3$ $\phi_1 = 33^\circ$	10m
Sand 2 $\gamma_2 = 17 \text{ kN} / \text{m}^3$ $\phi_2 = 35^\circ$	20m
Sand 3 $\gamma_3 = 18 \text{ kN} / \text{m}^3$ $\phi_3 = 37^\circ$	27m

Fig. 9. Soil properties.

에 따라 계산된 P-y 곡선은 Fig. 10과 같다.

3.2 유한요소 모델링 및 고유치 해석

범용 유한요소해석 프로그램인 Ansys 12.0을 사용하여 유한요소 모델 및 구조해석을 하였다(ANSYS user's manual, Ver. 12.0). 블레이드(Blade) 및 너셀(Nacelle)은 집중질량으로 고려되었으며, 재킷(Jacket) 및 타워(Tower)는 보(Beam)요소를 사용하여 Fig. 11과 같이 모델링 하였다.

지반부분에 사용된 비선형 스프링은 1 m 간격으로 모델링 되었으며, 고유치 해석 결과 모드 형상은 Fig. 12와 같고, 고유 진동수는 각각 0.267 Hz, 1.577 Hz로 나타났다.

3.3 환경하중

풍하중의 분포를 구하기 위해 GH_Blated(Bladed Multi-body dynamics user manual, Ver. 4.4)를 사용하였으며, 바람장 생성시 IEC 61400-1(IEC 61400-1 Ed.3, 2005) CLASS II 등급에 해당하는 설계풍속 42.5 m/sec, 난류강도(I_{ref})는 0.12로 설정되었다. Fig. 13은 1시간 동안 시뮬레이션을 통해 계

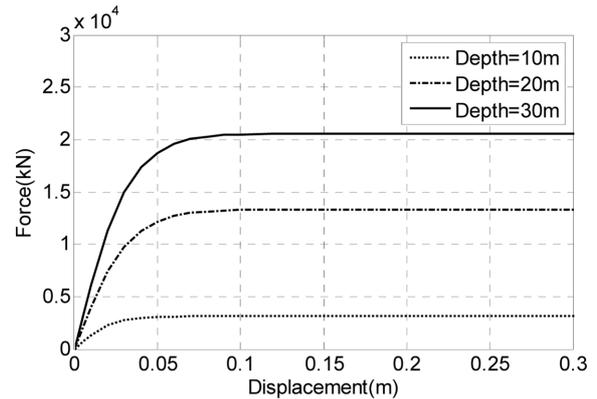


Fig. 10. P-y curves for API sand(cyclic loading conditions).

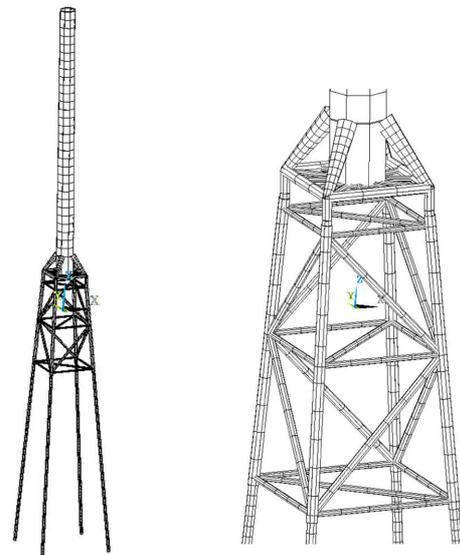


Fig. 11. FEM model.

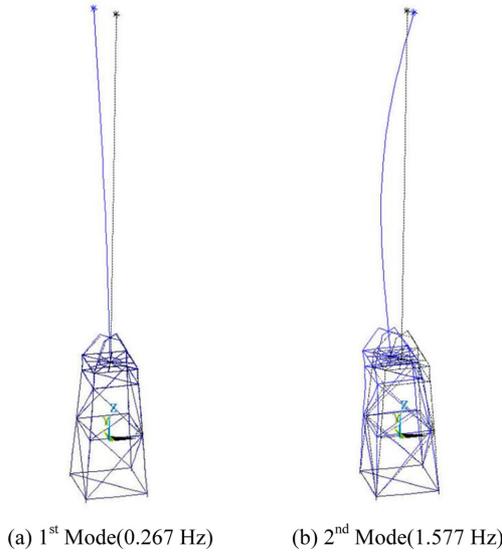


Fig. 12. Mode shapes.

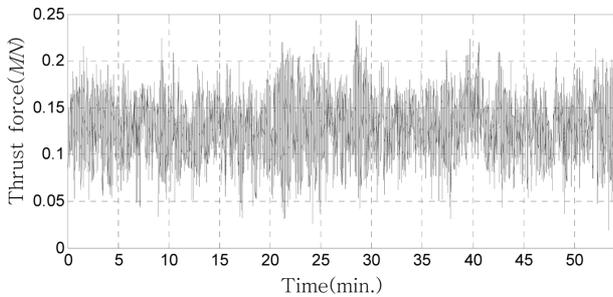


Fig. 13. Thrust force time history.

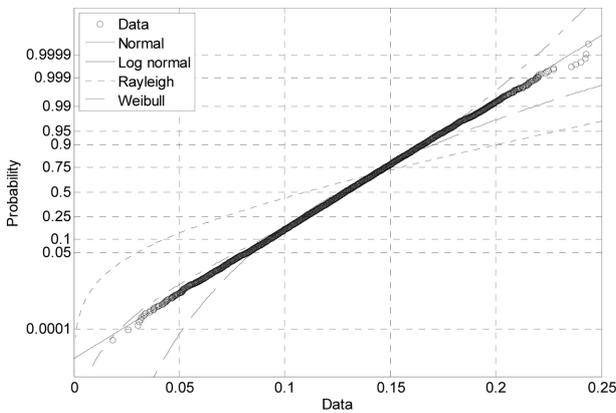


Fig. 14. Probability plot for thrust force.

산된 추력을 나타낸 것이다.

정적하중으로 고려된 추력은 Fig. 14와 같이 정규분포 확률변수로 추정되었으며, 평균은 0.129 MN, 변동계수(COI)는 0.22 이다.

타워(Tower)에 작용하는 풍하중을 계산하기 위해서는 풍속이 필요하며, 작용하는 추력에 해당하는 풍속은 식(14)를 통해 계산할 수 있다.

$$V = F_V^{-1}(F_{fh}) \tag{14}$$

Table 3. Design environmental condition

Operating condition	Parked(Idleing)	
Significant wave height, H_s	7.4 m	50 year return
Peak spectral period, T_p	15.19 sec	JONSWAP spectrum
Mean wind speed	42.5 m/sec	CLASS II, 난류강도 (I_{ref}):0.12
Water depth	17.726 m	Approx H.H.W.

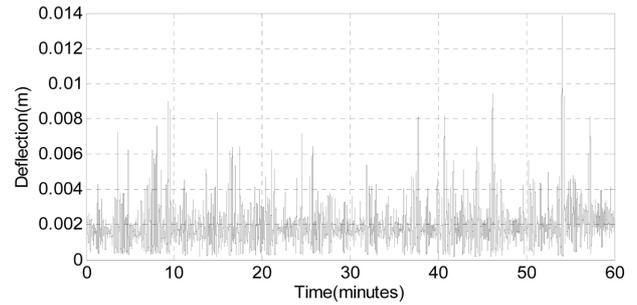


Fig. 15. Dynamic response of support structure at mud-line.

여기서, F_{fh} 는 추력에 대한 누적확률분포함수이고, F_v 은 풍속의 누적확률분포함수이다.

타워(Tower)에 작용하는 단위 길이당 풍하중은 식(15)와 같이 계산할 수 있다.

$$f_i(z) = \frac{1}{2} \rho_{air} C_i V^2(z) D(z) \tag{15}$$

여기서, ρ_{air} 는 공기의 밀도, C_i 는 타워(Tower)의 항력계수, V 는 풍속, z 는 해수면으로부터 높이, D 는 타워(Tower)의 직경이다. 그리고 해상풍력터빈의 작동상태 및 해상환경조건을 정리하면 Table 3과 같다.

3.4 동적구조해석 및 피크응답의 분포

설계 파랑 및 풍하중에 대한 해상풍력터빈의 동적구조해석을 수행하였다. 시뮬레이션 시간은 1시간이며, mud-line에서의 시간이력 수평변위 응답은 Fig. 15와 같다. 해석에 사용된 PC는 OS Windows7 64bit, CPU Quad core(3.4 GHz) 환경이며, 해석에 약 13시간 30분이 소요되었다. 따라서 해상풍력터빈의 신뢰성 해석시 동적 구조해석을 직접 사용하여 파괴확률을 산정하는 것은 사실상 불가능하다.

Block maxima 방법을 사용하여 피크응답에 대한 확률분포를 추정하였으며, block 크기는 1분이다. 그 결과 Fig. 16과 같이 Log normal 분포가 적합한 것으로 나타났다.

Fig. 17과 Table 4는 설계변수(X) 변화에 따른 동적응답계수(R_n)의 확률밀도함수와 그에 대한 확률분포 모수이며, 확률밀도함수는 거의 동일한 형태를 유지하는 것을 알 수 있다. 이는 설계변수 변화에 따른 동적피크응답이 크거나 작게 나타날 수 있

지만 그에 따라 정적인 응답 또한 동적피크응답에 대해 유사한 비율로 증가 또는 감소한다는 의미이다. 그러므로 임의의 설계조건에서 정적응답과 정의된 동적응답계수를 통해 동적응답을 예측하는 방법이 적용 가능하다는 것을 입증하고 있다.

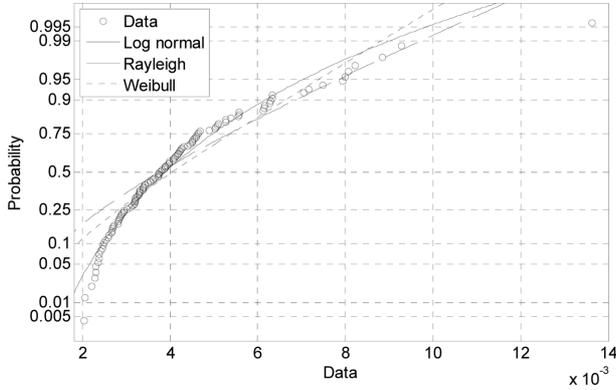


Fig. 16. Probability plot for peak response.

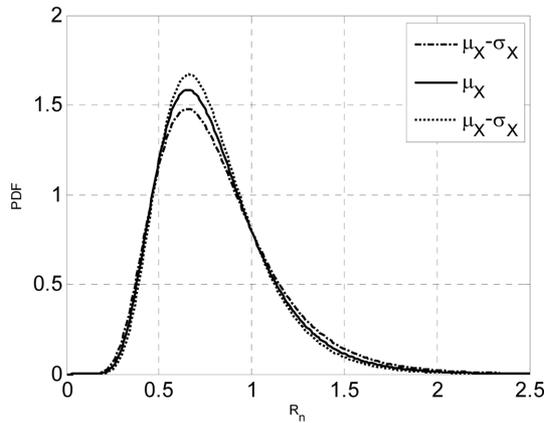


Fig. 17. PDFs of normalized peak response under different environmental load.

Table 4. Mean and standard deviation for the lognormal distributions.

	λ	ζ
$\mu - \sigma$	-0.2792	0.3843
μ	-0.2929	0.3602
$\mu + \sigma$	-0.2965	0.3407

Table 5. Distribution of random variables

Random variable	Symbol	Value	Distribution
Peak response ratio	R_n	$\lambda_{R_n} = -0.2929, \zeta_{R_n} = 0.3602$	Log normal
Thrust force	f_h	$\mu_{f_h} = 0.129$ MN, COV = 0.22	Normal
Effective unit weight of soil	Layer 1	$\mu_{\gamma_1} = 16$ kN/m ³ , COV = 0.05	Normal
	Layer 2	$\mu_{\gamma_2} = 17$ kN/m ³ , COV = 0.05	Normal
	Layer 3	$\mu_{\gamma_3} = 18$ kN/m ³ , COV = 0.05	Normal
Internal friction angle of sand	Layer 1	$\mu_{\phi_1} = 33^\circ$, COV = 0.07	Beta
	Layer 2	$\mu_{\phi_2} = 35^\circ$, COV = 0.07	Beta
	Layer 3	$\mu_{\phi_3} = 38.5^\circ$, COV = 0.07	Beta

3.5 신뢰성 해석 Level II(FORM)

FORM을 사용하여 신뢰성 해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 확률변수는 Table 5와 같다. 동적응답계수는 동적응답의 분석을 통해 Log normal 분포로 고려되었으며, 지반의 단위중량 및 추력은 정규분포, 그리고 지반의 내부마찰각은 상한과 하한이 정해진 Beta분포로 가정하였다.

한계상태함수는 식(16)과 같이 mud-line에서 지지구조물의 허용 수평변위를 사용하여 정의하였다.

$$g = R_{all} - R_n R_{st}(f_w, f_h, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \phi_1, \phi_2, \phi_3) \quad (16)$$

여기서 f_w 는 모리슨 방정식에 의해 계산된 파력으로 지지구조물에 분포하중으로 적용되었으며, 파력 산정시 사용된 재현주기 50년에 해당하는 유의파고(H_s)는 상수로 가정하였다.

허용 수평변위인 R_{all} 은 교량설계에 적용되는 AASHTO LRFD Bridge Design Specification를 준용하여 38 mm로 결정하였다.

신뢰성해석 결과 신뢰도지수(β)는 Fig. 18과 같이 약 40번의 반복과정 이후 6.0493으로 수렴되었다. 신뢰도지수의 수렴이 비교적 느린 이유는 내부마찰각이 상한과 하한이 정해져 있는 Beta분포로 고려되었기 때문이다.

각 확률변수의 민감도계수(Sensitivity factors) 및 Most probable failure point(MPDF)는 Table 6과 같다. Table 6에 나타난 민감도 계수 및 MPDF를 통해 알 수 있듯이 동적응답계수가 가장 주요한 요인이며, 그 다음으로 풍하중인 것을

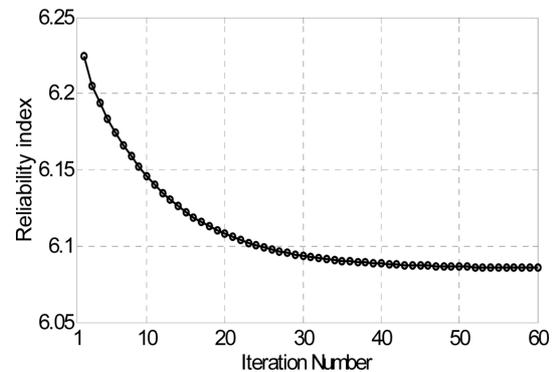


Fig. 18. Reliability analysis by FORM.

Table 6. Sensitivity factors and most probable failure points

Random variable	Sensitivity factor	MPFP
R_n	-0.9916	6.5609
f_h	-0.1204	0.1499 MN
γ_1	0.0065	15.9683 kN/m ³
γ_2	3.8495e-7	17 kN/m ³
γ_3	4.7536e-10	18 kN/m ³
ϕ_1	0.0467	31.9651°
ϕ_2	0.0009	34.9865°
ϕ_3	4.3865e-7	38.5°
Reliability index, β	6.0857	

알 수 있다. 그리고 지반 물성 관련 확률변수 중 표층의 지반내부마찰각인 ϕ 를 제외한 다른 확률변수의 민감도는 매우 작은 것으로 나타났다.

3.6 접근방법의 제한사항

설계변수(X) 변화에 따른 동적응답계수(R_n)의 확률밀도함수들을 비교한 결과 Fig. 17에서와 같이 거의 동일한 형태를 유지하는 것을 알 수 있었기 때문에 본 연구에서는 해상풍력터빈 지지구조물의 동적응답계수(R_n)가 일정하다고 가정하였다. 그러나 설계변수(X)에 따른 구조물의 동/정적 응답 비선형성이 큰 경우에는 검증되지 않았다. 따라서, 이 방법은 대상이 되는 구조물의 비선형성을 주의 깊게 식별한 후 적용해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 동적응답을 기반으로 한 해상풍력터빈 지지구조물의 신뢰성해석을 수행하였다. 제안된 방법에서 한계상태함수는 동적응답을 기반으로 정의되지만 동적응답계수의 분포를 추정하기 위해 동적 구조해석은 한번만 수행한다. 동적응답을 통해 추정된 피크응답의 분포함수는 정적응답으로 정규화 하여 새로운 확률변수인 동적응답계수(R_n)를 도입하였다. 따라서 동적응답은 정적해석을 통해 정의된 응답면과 동적응답계수의 곱으로 정의하였다. 여기서, 동적응답계수(R_n)의 분포함수는 설계변수(X) 변화에도 거의 동일한 것으로 나타나 허용 가능한 오차라고 판단하여 R_n 은 일정하다고 가정하였다. 수치해석의 예로 5-MW 해상풍력터빈 지지구조물에 제안된 접근방법을 적용하였다. 신뢰성 해석 수행시 극한 해양환경 하중 및 지반물성을 확률변수로 고려하였고, 한계상태함수는 수평변위를 기준으로 정의하여 해상풍력터빈 지지구조물의 신뢰도지수를 산정하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2012R1A1A4A01010830).

참고문헌

- Cheng P. W. (2002). A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines, PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Agarwal, P. (2008). Structural Reliability of Offshore Wind Turbines, PhD Thesis, The University of Texas at Austin.
- Hasofer, A. M., Line, L. C. (1974). Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 100, pp.111-121.
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., and Schaaf, S. A. (1950). The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Transactions, AIME, 189, pp. 149-157.
- American Petroleum Institute (2007). Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. API Publishing Services.
- Schueller, G. I., Bucher, C. G., Bourgund, U. and Ouyornpasert, W. (1987). On Efficient Computational Schemes to Calculate Structural Failure Probabilities, Stochastic Structural Mechanics, U.S.-Austria Joint Seminar. pp. 338-410.
- Khuri, A. I., Cronell, J. A. (1987). Response Surfaces: Designs and analyses. Dekker, New York.
- Jonkman J., Butterfield S., Musial W., Scoot G. (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, NREL/TP-500-38060.
- ANSYS user's manual (Ver. 12.0). ANSYS Inc.
- International Electrotechnical Commission(IEC) (2005). IEC 61400-1 Ed.3, Wind turbines-Part 1: Design requirements.
- Bladed Multibody dynamics user manual (Ver. 4.4). Garrad Hassan.
- AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications (2007). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- 원고접수일: 2014년 1월 14일
수정본채택: 2014년 2월 10일(1차)
2014년 2월 25일(2차)
2014년 2월 25일(3차)
2014년 2월 26일(4차)
게재확정일: 2014년 2월 26일