

Seismic Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine Jacket Structure Using Stress Limit State

Gee-Nam Lee* and Dong-Hyawn Kim**

*Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, Korea

**Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Jeonbuk, Korea

응력한계상태를 이용한 해상풍력발전기 재킷구조물의 지진신뢰성해석

이기남* · 김동현**

*군산대학교 해양산업공학과

**군산대학교 해양공학과

KEY WORDS: Support structure 지지구조물, Reliability analysis 신뢰성해석, Earthquake 지진, Peak response factor 피크응답계수, Stress concentration factor 응력집중계수, Response surface method 응답면기법

ABSTRACT: Considering the effect of dynamic response amplification, a reliability analysis of an offshore wind turbine support structure under an earthquake is presented. A reliability analysis based on the dynamic response requires a large amount of time when using not only a level 3 approach but also level 2 such as a first order reliability method (FORM). Moreover, if a limit state is defined by using the maximum stress at a structural joint where stress concentration occurs, a three-dimensional element should be used in the finite element analysis. This makes the computational load much heavier. To deal with this kind of problem, two techniques are suggested in this paper. One is the application of a quasi-static structural analysis that takes the dynamic amplification effect into account. The other is the use of a stress concentration factor to estimate the maximum local stress. The proposed reliability analysis is performed using a level 2 FORM and verified using a level 3 simulation approach.

1. 서 론

해상풍력발전기는 해상 환경에 노출되어 다양한 요인에 의해 손상 및 파괴가 발생할 수 있다. 그 중 상시 작용하는 바람 및 파랑하중과는 달리 지진하중은 단시간 내에 비교적 큰 손상을 발생시킬 수 있으며, 예기치 못한 큰 지진의 발생은 풍력단지의 기능 저하 또는 붕괴를 유발하여 많은 재산 피해를 초래한다. 이러한 이유로 해상풍력발전기의 내진성능에 대한 평가가 필요하며, 외력에 저항하는 지지구조물에 대한 안전성이 확보되어야 한다. 일반적으로 해상풍력발전기의 지지구조물은 자중에 의해 지지되는 중력식, 지반에 관입된 말뚝으로 지지되는 모노파일, 재킷, 트라이포드 형식이 주를 이룬다. 중력식 지지구조물의 경우 해저면의 마찰력과 구조물의 자중으로 외력에 저항하며, 관입 말뚝에 의해 지지되는 형식들은 불확실성이 매우 큰 지반물성이 구조물의 안정성에 높은 영향을 미친다. 해상에 작

용하고 있는 외력과 구조물 설치 지역의 지반조건 등 구조물의 응답에 영향을 줄 수 있는 다양한 요인들에는 모두 불확실성이 존재하며, 구조물의 안전성이 확보된 설계를 위해서는 불확실성을 고려한 신뢰성해석이 수행되어야한다. 신뢰성해석을 적용한 선행 연구들에서는 한계상태함수를 정의할 때 정적응답을 이용하였다(Lee and Kim, 2011; Yoon et al., 2013; Yoon et al., 2014). 그러나 발전기에 작용하는 외력들은 시간에 따라 변화하는 동적하중으로써 정확한 신뢰성을 확보하기 위해서는 동적응답을 신뢰성해석에 사용해야한다. 그러나 동적 구조해석은 정적 구조해석에 비해 많이 소요시간이 필요하고, 응답면의 추정과 신뢰성해석 시 반복된 구조해석이 요구되어 동적응답을 적용하기에는 시간적 어려움이 따른다.

본 연구에서는 동적응답을 직접적으로 신뢰성해석에 사용하지 않고, 동적 특성을 해석에 반영할 수 있는 방법을 제안하기 위해 피크응답계수(PRF, Peak response factor)라는 확률변수를

Received 2 February 2016, revised 10 June 2016, accepted 18 August 2016

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

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSCE 2015 Convention in Kunsan.

도입하였다. 피크응답계수는 동일한 조건 하에 정/동적 구조해석을 수행하여 얻은 정적응답 및 동적 피크응답의 비로 정의된다(Lee and Kim, 2014). 이를 이용하면 기존 신뢰성해석 방법을 그대로 사용하면서도 해석시간 문제를 해결할 수 있고, 더불어 동적효과를 반영할 수 있다. Lee and Kim(2014)과 Lee and Kim(2015)의 연구에서는 지지구조물에 대하여 변위를 기반으로 신뢰성 해석을 수행하였으나 응력집중으로 인하여 용접부에서 발생한 응력이 부재의 허용 응력을 초과할 가능성이 있으므로 응력 기반 신뢰성 해석이 요구된다. 그러나 응력집중을 고려하기 위해서는 해석 시 상세모델이 요구되며, 이를 신뢰성 해석에 직접 적용할 경우 반복된 해석으로 인해 상당한 시간이 소요된다. 이에 본 연구에서는 응력집중계수(SCF, Stress concentration factor)를 이용하여 응력집중 현상을 고려하고, 소요되는 시간을 단축함으로써 해석의 효율성을 높였다. 수치 예제에는 5MW급 해상풍력발전기를 사용하였으며, 지지구조물은 재킷(Jacket) 형식을 적용하였다. 재킷 형식 지지구조물은 강관 말뚝이 지반에 관입되어 외력에 저항하므로 안전성에 주된 영향을 미치는 지반의 물성과 지진하중을 확률변수로 고려하였다. 사용된 신뢰성해석 방법은 Level II 방법에 해당하는 일계신뢰도법(FORM, First order reliability method)을 사용하였으며, Level III 방법에 해당하는 LHS(Latin hypercube sampling) 기반 MCS(Monte carlo simulation)을 수행하여 산정된 파괴확률을 참값으로 가정하여 피크응답계수가 사용된 신뢰성해석 방법을 검증하였다. 추가적으로 동적효과가 반영되지 않은 기존 정적응답 신뢰성해석 결과와 비교하여 피크응답계수의 영향을 확인하였다.

2. 이론적 배경

2.1 신뢰성해석

본 연구에서는 신뢰성해석에 Level II 방법과 Level III 방법을 사용하였다. Level II 방법은 정의된 한계상태함수를 이용하여 파괴점(또는 설계점) 부근에서 근사적으로 해를 찾는 방법이고, Level III 방법은 난수를 발생시켜 파괴가 일어나는 경우에 대한 확률을 직접적으로 구하는 방법으로써 추출법이라 불린다. 추출법은 다른 수준의 방법에 비해 가장 정확하며, Level II 방법의 결과 검증에 많이 사용된다.

Level II 방법에서 설계 파괴면을 Taylor 급수 전개를 통해 선형함수로 근사하여 신뢰도지수를 구하는 방법인 AFOSM(Advanced first order second moment)방법을 이용하였으며, 정의된 한계상태함수가 0이 되는 면을 설계 파괴면이라 한다.

비정규분포 확률변수를 적용하기 위해 Rackwitz-Fiessler 방법을 사용하였다(Hasofer and Lind, 1974; Rackwitz and Fiessler, 1978).

Level III 방법은 일반적으로 MCS가 사용된다. 그러나 MCS는 수많은 난수를 추출하여 사용하기 때문에 동적 해석을 적용할 경우 많은 시간이 소요되므로 적절치 못하다. 따라서 본 연구에서는 LHS 방법을 이용하여 Level III 신뢰성해석을 수행하였다. LHS방법은 확률변수의 분포 특성에 맞는 값을 추출할 때 균등한 확률을 갖도록 확률분포를 n 개의 영역으로 나누어 각

구간에서 하나의 값을 중복되지 않도록 추출하는 방법이다. 또한 확률변수가 두 개 이상인 경우 분할된 구간에서 서로 겹치지 않도록 배열하여 값을 취한다(Andrzej and Kevin, 2000).

2.2 응답면 기법

Level II 방법을 이용할 경우 확률변수에 의해 정의된 한계상태함수가 명시적인 양함수로 표현이 가능해야 한다. 그러나 구조물의 변위나 응력 등 구조물의 응답에 의해 한계상태함수가 정의된 경우 확률변수들에 의해 중속되는 암시적인 음함수 형태로 표현되므로 기존 신뢰성 해석의 적용에 어려움이 따른다. 이러한 경우 응답면 기법을 이용하여 해결할 수 있다. 이 방법은 음함수 형태의 한계상태함수를 원하는 구조응답을 이용하여 양함수의 형태로 근사화 함으로써 가능한 모든 구조해석과 파괴양식을 고려할 수 있는 장점이 있다(Scheuller et al., 1987).

응답면 기법은 근사의 정도, 근사를 위해 필요한 구조해석의 횟수, 구조해석을 수행할 표본점의 선정 등이 중요하다. 표본점 선정은 중심점을 정하여 그 주변으로 일정 거리만큼 떨어진 점을 취하는 방법이 일반적으로 사용되며, 해당 표본점에서 구조해석을 수행하여 응답면을 구할 수 있다(Khuri and Cornell, 1987).

표본점 선정방법으로는 BBD(Bucher-Bourgund design), CCD(Central composite design), 그리고 SD(Saturated design) 방법이 사용되고 있다. BBD는 근사된 한계상태식이 갖는 통계적 성질을 포기하는 대신 표본점의 수를 줄여 근사에 필요한 구조해석의 횟수를 줄이는 방법으로 연성향이 없는 이차 다항식이다(Bucher and Bourgund, 1987). CCD는 일정한 통계적 특성을 보장하는 응답면 근사식을 얻기 위한 표본점 선정방법으로 연성향을 포함하는 이차 다항식이다(Box and Wilson, 1951). SD는 통계적 성질을 반영하고 CCD에 비해 구조해석의 횟수를 줄이는 방법으로 연성향을 부분적으로 고려한다(Haldar and Mahadevan, 2000). 본 연구에서는 설계변수의 중심점으로부터 $+h_i\sigma_{X_i}$ 방향의 연성향을 고려한 SD 방법을 이용하여 응답면을 추정하였다.

2.3 피크응답계수

정확한 구조응답을 얻기 위해서는 동적 구조해석이 수행되어야 하지만 이는 정적 구조해석에 비해 소요 시간이 많을 뿐만 아니라 신뢰성해석에서는 반복된 구조해석이 요구되므로 매회 동적 피크응답을 구하기에는 어려움이 따른다. 때문에 기존의 신뢰성해석에서는 정적 구조해석을 통해 얻은 응답이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 기존의 신뢰성해석 방법을 적용하되 동적 효과를 고려하기 위해 다음과 같이 새로운 확률변수인 피크응답계수를 사용하였다(Lee and Kim, 2014).

$$R_n = R_{peak}/R_{static} \quad (1)$$

위와 같이 피크응답계수는 동적 피크응답(R_{peak})과 정적응답(R_{static})의 비로 정의되며, 이를 이용하여 한계상태함수를 정의하면 식 (2)와 같다.

$$g(X) = R_{allowable} - R_n R_{static} \quad (2)$$

피크응답계수와 확률변수의 결합 확률밀도함수, 그리고 한계 상태함수를 표준정규분포 공간에 표현하면 FORM을 통해 원점과 파괴면의 최단거리인 신뢰도지수(β)를 구할 수 있다.

피크응답계수는 구조물 및 하중의 동적 특성에 의해 결정되며, 구조물 설계의 변경에 따라 주파수 및 하중으로 인한 응답 특성이 변화할 수 있다. 따라서 설계가 변경되는 경우 피크응답계수는 재산정해야만 한다. 또한 구조물의 고유진동수와 하중의 가진진동수의 비인 진동수비가 1.0에 근접할 경우 하중이 작용함에 따라 전체 시스템의 주파수 특성이 변하게 되면서 동적 증폭 효과도 급격히 변할 수 있다. 이 경우 산정된 피크응답계수의 사용이 타당하지 않을 수 있으므로 반드시 주파수 변화에 따른 증폭 효과의 변화를 확인하여 사용해야 할 것이다.

2.4. 응력집중계수

재킷 형식의 지지구조물과 같이 부재의 연결이 용접으로 이루어진 경우 응력집중에 취약한 구조이다. 이러한 구조의 경우 상세 모델링을 통해 합리적인 응력을 산정해야 한다. 그러나 많은 소요시간이 요구되는 동적 구조해석과 반복된 구조해석이 필요한 신뢰성해석 등으로 인해 상세 모델링을 해석에 직접적으로 적용하기에는 어려움이 따른다. 일반적으로 실제 발생하는 국부 응력과 공칭응력의 비로 계산되는 응력집중계수를 이용하여 이음부의 응력을 산정하여 사용한다. 본 연구에서는 취약부위에 대해 보(Beam)요소와 판(Shell) 요소를 이용하여 각각 구조해석을 수행하고, 식 (3)을 이용하여 응력집중계수를 산정하였다.

$$SCF = \sigma_{hotspot} / \sigma_{nominal} \quad (3)$$

3. 수치해석

3.1 구조물 및 환경조건

구조해석에 사용된 상부구조물과 지지구조물은 다음 그림과 같이 5MW급 해상풍력발전기(Jonkman et al., 2009)와 서남해안의 환경조건에 부합하도록 설계된 재킷 구조의 지지구조물을 사용하였다. 재킷 형식의 지지구조물은 타 형식에 대비하여 깊은 수심과 대형 풍력발전기에 적합하며, Oil & Gas 해상 플랜트 분야에서 많이 사용되고 있어 경험적 지식이 풍부하다는 장점이 있다(Lee and Im, 2011). RNA(Rotor and nacelle assembly)는 Rotor가 110ton, Nacelle은 240ton으로 모델링 시 집중질량으로 고려하였다. 모델링 및 구조해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS ver. 12.0 (Ansys Inc, 2009)을 사용하였다.

지반은 Fig. 1(a)와 같이 점성토층과 사질토층으로 각각 15.5m, 18.5m의 심도를 갖도록 가정하였다. 말뚝변위-지반반력의 함수관계를 p-y 곡선이라 표현하고, API RP 2A(American Petroleum Institute, 2007)에는 각 지층에 따라 다른 p-y 곡선 산정식이 제시되어 있다.

점성토 지반은 식 (4)로부터 계산된 극한 지지력(p_u)과 Table 1의 하중-변위 관계를 이용하여 p-y 곡선을 계산한다. 여기서, $X, c, D, \gamma, J, X_R, y_c, \epsilon_c$ 는 각각 지표면에서의 깊이, 비배수전단강도, 말뚝의 직경, 유효 비중량, 경험상수, 식 (5)로 계산되는 임계 깊이, 임계 변위에 대한 매개변수($y_c = 2.5\epsilon_c D$), 비배수 압축시험에서 구한 최대 응력의 절반에 해당하는 변형률을 의미한다.

$$p_u = \begin{cases} 3c + \gamma X + J \left(\frac{cX}{D} \right) \\ 9c \end{cases} \quad \text{for } X \geq X_R \quad (4)$$

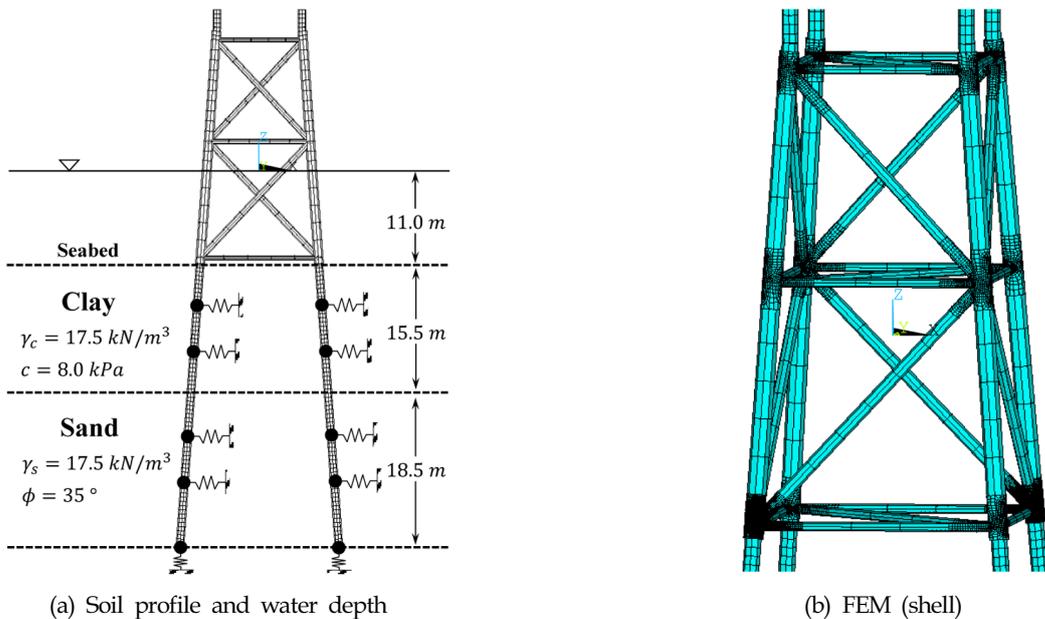


Fig. 1 Offshore wind turbine

Table 1 p-y curves under cyclic loading (clay)

| $X > X_R$ | | $X < X_R$ | |
|-----------|----------|--------------|----------|
| p/p_u | y/y_c | p/p_u | y/y_c |
| 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 |
| 0.23 | 0.1 | 0.23 | 0.1 |
| 0.33 | 0.3 | 0.33 | 0.3 |
| 0.50 | 1.0 | 0.50 | 1.0 |
| 0.72 | 3.0 | 0.72 | 3.0 |
| 0.72 | ∞ | 0.72 X/X_R | 15.0 |
| - | - | 0.72 X/X_R | ∞ |

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{c} + J} \quad (5)$$

사질토층의 p-y 곡선은 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다. 식에서 사용되는 k_ϕ , X , A 는 각각 초기지반반력계수, 지표면에서의 깊이, 반복하중과 정적하중을 결정하는 계수를 의미하며, A 는 식 (7)을 통해 산정할 수 있다. 여기서 초기지반반력계수는 내부마찰각과의 관계(참고문헌의 102쪽, Fig 3.31 참고)를 이용하여 정의할 수 있다(Reese and Van Impe, 2007). 극한 지지력은 식 (8)과 같이 C_1 , C_2 , C_3 를 이용하여 산정하고, 각 계수들은 내부마찰각과의 관계(참고문헌의 70쪽, Fig. 6.8.6-1 참고)를 통해 정의된다(API, 2007).

$$p = A p_u \tanh \left[\frac{k_\phi X y}{A p_u} \right] \quad (6)$$

$$A = \begin{cases} 0.9 & \text{for cyclic loading} \\ \left(3 - 0.8 \frac{X}{D} \right) \geq 0.9 & \text{for static loading} \end{cases} \quad (7)$$

$$p_u = \begin{cases} p_{us} = (C_1 X + C_2 D) \gamma X \\ p_{ud} = C_3 D \gamma X \end{cases} \quad (8)$$

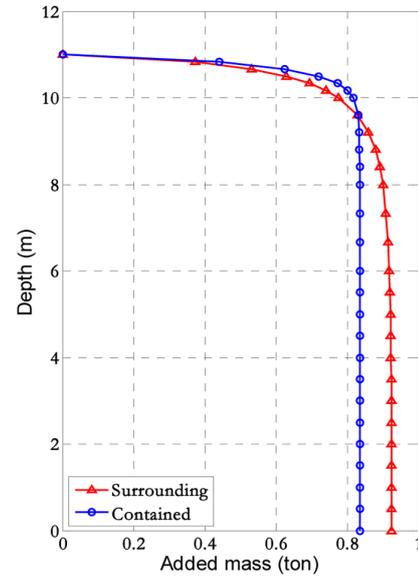
유체의 영향을 고려하기 위해 Goyal and Chopra(1989)가 제안한 부가질량법을 적용하였다. 이는 해수가 비압축성 유체라는 가정을 기초로 원통형 실린더 형식의 지지구조물에 작용하는 해수면 아래의 수압을 등가의 부가질량으로 고려하는 방법이다. 다음 식은 말뚝의 내/외부에 작용하는 부가질량(m_a^o , m_a^i) 산정식으로 z , ρ_w , r_o , r_i , H_o , H_i 는 각각 구조물이 해수에 잠겨 있는 총 깊이, 해수의 밀도, 지지구조물의 내/외부 반경, 내/외부 높이를 의미한다. Fig. 2에는 수심에 따라 외부와 내부에 작용하는 압력을 통해 계산된 부가질량을 나타내었다.

$$m_a^o = (\rho_w \pi r_o^2) \left\{ \frac{16}{\pi^2} \frac{H_o}{r_o} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} E_m \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) \cos \left(\alpha_m \frac{z}{H_o} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

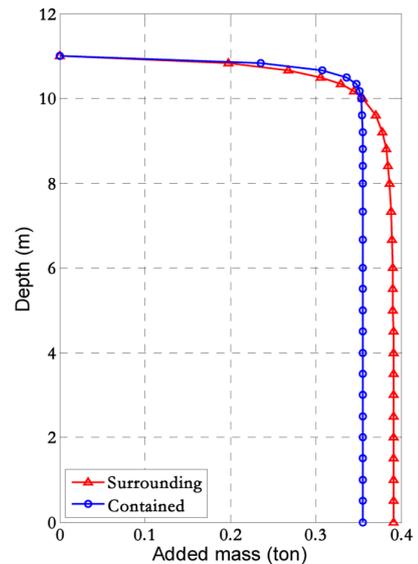
$$m_a^i = (\rho_w \pi r_i^2) \left\{ \frac{16}{\pi^2} \frac{H_i}{r_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} D_m \left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) \cos \left(\alpha_m \frac{z}{H_i} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

$$E_m \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) = \frac{K_1 \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right)}{K_0 \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) + K_2 \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right)} \quad (11)$$

$$D_m \left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) = \frac{I_1 \left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right)}{I_0 \left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right) + I_2 \left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i} \right)} \quad (12)$$



(a) Pile



(b) Bracing

Fig. 2 Hydrodynamic added mass on jacket type substructure

Table 2 Peak ground accelerations at site

| Average return period [year] | Excess probability / period [year] | Peak ground acceleration [g] |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 50 | 10 % / 5 | 0.010 |
| 100 | 10 % / 10 | 0.030 |
| 200 | 10 % / 20 | 0.045 |
| 500 | 10 % / 50 | 0.060 |
| 1000 | 10 % / 100 | 0.080 |
| 2400 | 10 % / 250 | 0.110 |
| 4800 | 10 % / 500 | 0.145 |

지진하중에 대해 항만 및 어항 설계기준(MOF, 2005)에는 각 재현주기 별 지진재해도가 제시되어 있으며, 구조물 설치 예상 지역에 대한 재현주기 별 지진가속도를 Table 2에 정리하였다. 설치 예상 지역은 한국전력공사에서 설치한 관측타워(HeMOSU-1)의 설치지점으로 가정하였다. 해당 지점에 대한 위도 및 경도는 각각 $126^{\circ} 07' 45.30''$, $35^{\circ} 27' 55.17''$ 이다. 지진가속도의 확률분포는 와이불(Weibull) 분포를 따르며, 확률분포의 모수를 식 (14)의 재현주기(T)와 지진가속도(K_h^T)의 관계로부터 구할 수 있다. Table 2의 자료와 식 (15)를 통해 회귀분석을 수행하여 $b = 4.001 \times 10^{-4}$, $k = 0.3636$ 의 모수를 산정하였다. 지진가속도에 따른 초과확률과 위의 모수를 이용하여 구한 초과확률을 Fig. 3에 도시하였다.

$$F_x(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^k\right] \quad (13)$$

$$K_h^T = F_{K_h}^{-1}(1-1/T) \quad (14)$$

$$K_h^T = b(\ln(T))^{1/k} \quad (15)$$

피크응답계수의 산정에는 정/동적 구조해석이 수행되며, 동적 구조해석 시 설치 예상 지역의 지진가속도 시간이력 정보가 필요하다. 그러나 해당 지역의 계측 자료가 존재하지 않으므로 장주기 특성 지진인 Hachinohe 지진과 단주기 특성 지진인 Ofunato 지진, 그리고 가정된 설치 예상 지역의 지반조건에 부합도록 생성된 인공지진을 이용하여 동적 구조해석에 사용하였다. 피크응답계수의 확률분포에 대해 정확한 추정을 위해서는 충분한 양의 피크응답계수가 요구되므로 인공지진 생성 시 하나의 최대지반가속도에 대해 8개의 Seed를 주어 생성하였다.

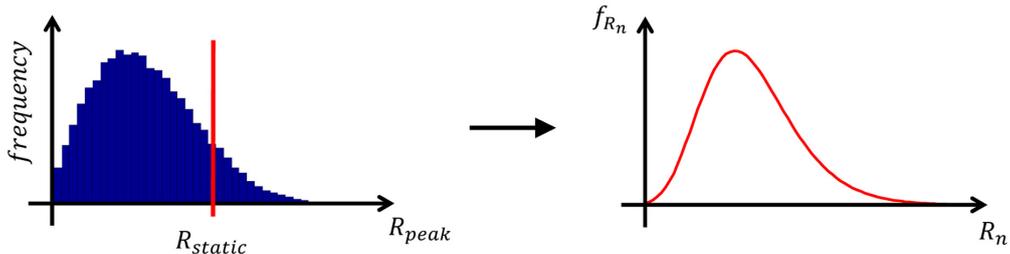


Fig. 4 Peak response factor

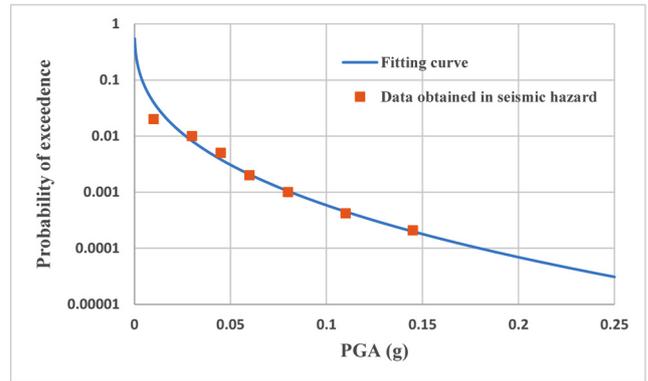


Fig. 3 Estimated probability of exceedence for PGA

구조해석에 사용된 최대지반가속도는 $0.025g$ 부터 $1.000g$ 까지 $0.025g$ 간격으로 총 40개를 적용하였으며, 인공지진의 경우 Seed의 적용으로 320회, Hachinohe 지진과 Ofunato 지진은 각각 40회의 구조해석이 수행되어 총 400회의 구조해석을 수행하였다. 해석을 통해 얻은 동적 피크응답의 정규화를 위해 40개의 최대지반가속도(PGA, Peak ground acceleration)에 대한 정적 구조해석을 수행하였으며, 같은 크기의 PGA를 적용하여 얻은 동적 피크응답을 정적 응답으로 나누어 피크응답계수를 산정하였다. PGA 하나의 값에 해당하는 동적 피크응답은 10개, 정적 응답은 1개로 이를 통해 10개의 피크응답계수를 구할 수 있다. 결국 모든 PGA에 대해 구조해석을 수행하면 총 400개의 피크응답계수를 구할 수 있고, Fig. 4와 같이 피크응답계수의 확률분포를 추정할 수 있다.

3.2 신뢰성해석

신뢰성해석에는 Level II (FORM) 방법과 Level III (LHS) 방법을 사용하였으며, 앞서 언급한 응력집중계수는 상세모델링을 통해 2.5로 산정되었다. 피크응답계수를 포함한 확률변수들, 그리고 응답면 기법을 이용하여 FORM에 사용되는 한계상태함수를 정의하면 식 (16)과 같고, LHS에 사용되는 한계상태함수는 식 (17)과 같다. 인장 허용응력이 항복응력의 60%를 초과하지 않도록 American Institute of Steel Construction(AISC)에서는 규정하고 있으므로 산정된 213MPa을 취약부위의 허용응력으로 정의하여 해석을 진행하였다(AISC, 1989).

$$g(X) = R_{allowable} - R_n R_{static} (K_h, \gamma_{clay}, \gamma_{sand}, \phi', c_u) SCF \quad (16)$$

$$g(X) = R_{allowable} - R_{peak}(K_n, \gamma_{clay}, \gamma_{sand}, \phi', c_u)SCF \quad (17)$$

3.2.1 확률변수 및 확률분포

앞서 수행된 정/동적 구조해석 결과를 통해 피크응답계수를 산정하였다. 응답에는 응력 결과를 사용하였으며, 확률분포를 추정할 결과 3-모수 와이블(3-Parameter Weibull) 분포에 가장 적합하였다. 해당 확률분포의 모수는 형상모수가 0.2572, 척도모수는 0.0962, 위치모수는 0.3005로 계산되었다. 지반물성의 분포에 대해 선행 연구들에서는 정규분포를 사용해왔다(Yoon et al., 2013; Yoon et al., 2014). 그러나 신뢰성 해석 시 지반물성의 민감도가 매우 높을 경우 정규분포를 사용하게 되면 0 또는 음수가 나올 가능성이 있으므로 본 연구에서는 대수정규분포를 사용하였다. 사질토층의 p-y 곡선 산정에 사용되는 초기지반반력계수는 곡선적합(Curve fitting)을 수행하고, 이를 통해 내부마찰각과 초기지반반력계수의 함수 관계를 정의함으로써 계산된다. 만약 신뢰성해석 시 내부마찰각이 큰 변동성을 보인다면, 내부마찰각 범위는 약 29°부터 40°까지 표현되어 있으므로 해당

범위를 벗어날 경우 타당하지 않은 초기지반반력계수가 산정될 수 있다. 따라서 내부마찰각의 확률분포는 상한과 하한을 지정할 수 있는 Beta 분포를 사용하였으며, 하한은 30°, 상한은 40°로 지정하였다.

Level II 신뢰성해석에 사용된 각 확률변수들의 분포와 모수를 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서 제안한 방법의 검증을 위해 약 3.0의 적절한 신뢰도지수에 부합되도록 지진계수의 평균값을 약 4배 정도 높여 모수를 조정하였다. 검증을 위한 Level III 방법(LHS)에는 동적 구조해석이 직접적으로 사용되기 때문에 피크응답계수는 확률변수로 취급하지 않았고, 800회의 샘플에 대한 동적응답의 확률분포를 추정하여 응답의 허용 값을 초과하는 파괴확률을 산정하였다.

3.2.2 신뢰성해석 결과

Level III 신뢰성해석(LHS)을 수행한 결과 신뢰도지수는 3.0327로 수렴되었으며, 수렴과정을 Fig. 5에 도시하였다. 피크응답계수를 확률변수로 취급하여 수행한 Level II 신뢰성해석(FORM)의

Table 3 Characteristics of random variables

| Random variables | Probability distribution | Characteristic value |
|---|--------------------------|---------------------------------------|
| Coefficient of earthquake (K_n) | weibull | $k=0.3636, b=1.6004 \times 10^{-3}$ |
| Peak response factor (R_n) | 3-parameters weibull | $k=0.2572, \sigma=0.0962, \mu=0.3005$ |
| Specific weight of clay (γ_{clay}) | Log-normal | $\lambda=2.8511, \zeta=0.1492$ |
| Specific weight of sand (γ_{sand}) | Log-normal | $\lambda=2.8792, \zeta=0.1492$ |
| Internal friction angle (ϕ) | beta | $q=r=1.5825$ |
| Undrained shear strength (c_u) | Log-normal | $\lambda=2.0467, \zeta=0.2558$ |

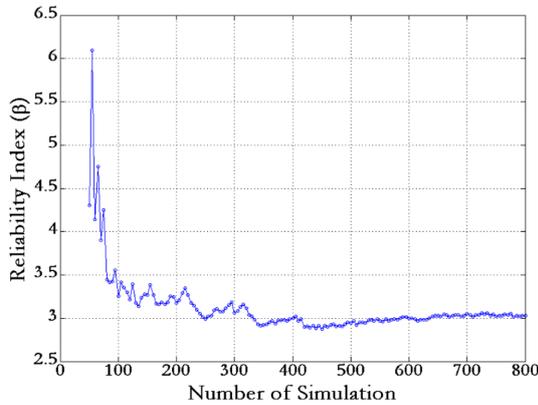


Fig. 5 Reliability index (LHS)

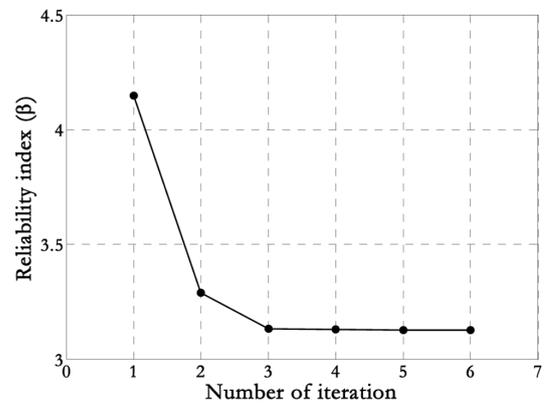


Fig. 6 Reliability index (FORM)

Table 4 MPFPs and sensitivity factors

| Random variables | PRF as variable | |
|--|---------------------------|----------------------------|
| | MPFPs | Sensitivity factors |
| Coefficient of earthquake (K_n) | 0.1521 g | - 0.8171 |
| Peak response factor (R_n) | 0.8032 | - 0.5763 |
| Specific weight of clay (γ_c) | 17.4406 kN/m ³ | -6.5781 × 10 ⁻³ |
| Specific weight of sand (γ_s) | 17.9126 kN/m ³ | -4.3604 × 10 ⁻⁶ |
| Internal friction angle (ϕ) | 34.9999° | 4.3718 × 10 ⁻⁶ |
| Undrained shear strength (c) | 7.6609 kPa | 1.3257 × 10 ⁻² |

Table 5 Reliability index & Computational time

| | LHS-based MCS | FORM (PRF as variable) |
|--------------------|-------------------|--|
| Reliability index | 3.0327 | 3.1269 |
| Computational time | 5 d 16 h 59 m 5 s | 3 d 3 h 57 m 14 s (4 m 18 s for FORM + 3 d 3 h 52 m 56 s for PRF) |

신뢰도지수는 3.1269로 나타났고, 수렴과정을 Fig. 6에 도시하였다. Table 4에는 각 확률변수들의 최확과피점(MPFP, Most probable failure point)과 민감도 계수(Sensitivity factors)를 나타내었으며, 해석에 사용된 PC의 정보는 OS Windows 7 64bit, CPU quad core(3.4GHz)이다. Table 5에는 Level II와 Level III 신뢰성해석 결과 및 각 해석에 소요된 시간을 나타내었다.

3.2.3 신뢰성해석 시 피크응답계수의 영향

본 연구에서 제안한 방법(Case 1)과 정적응답만을 사용하는 기존의 신뢰성해석 방법(Case 2)의 결과를 비교하기 위해 정적응답 기반 신뢰성해석을 수행하였다. 피크응답계수를 제외한 다른 확률변수들은 Table 3과 같은 값을 사용하였고, 수렴된 신뢰도지수를 Fig. 7에 도시하였다. Table 6에는 Case 2의 최확과

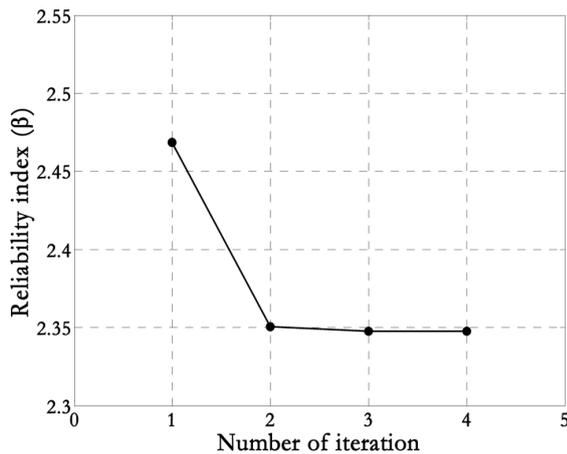


Fig. 7 Reliability index (FORM, PRF as constant)

Table 6 MPFPs and sensitivity factors (Case 2)

| Random variables | PRF as variable | |
|--|---------------------------|----------------------------|
| | MPFPs | Sensitivity factors |
| Coefficient of earthquake (K_h) | 0.1174 g | - 0.9997 |
| Specific weight of clay (γ_c) | 17.4465 kN/m ³ | -1.1030 × 10 ⁻² |
| Specific weight of sand (γ_s) | 17.9126 kN/m ³ | -6.9613 × 10 ⁻⁶ |
| Internal friction angle (ϕ) | 34.9999° | 7.4976 × 10 ⁻⁶ |
| Undrained shear strength (c) | 7.6416 kPa | 2.1874 × 10 ⁻² |

Table 7 Reliability index

| | Case 1 (PRF as variable) | Case 2 (PRF as constant) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Reliability index | 3.1269 | 2.3474 |

피점과 민감도 지수, Table 7에는 Case 1과 Case 2의 신뢰도지수를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 동적 피크응답과 정적응답의 비로 정의되는 피크응답계수를 확률변수로 취급함으로써 동적 구조해석의 단점인 소요시간 문제를 해결함과 동시에 동적 효과는 고려하는 방법을 제안하였다. 수치 예제로 재킷 형식 지지구조물에 제안된 방법을 적용하고 그 결과를 분석하였다.

Level II 신뢰성해석(FORM) 수행 결과 신뢰도지수는 약 3.1269로 수렴되어 파괴확률은 8.8330×10^{-2} %로 산정되었으며, Table 4와 같이 지진계수와 피크응답계수가 다른 확률변수들에 비해 매우 높은 민감도를 갖는 것으로 확인되었다. 지반물성은 지지구조물의 형식에 따라 민감도에 차이를 보일 수 있으며(Yi et al., 2015), 지반물성들 중 비배수전단강도가 결과에 미치는 영향이 비교적 큰 것을 알 수 있었다.

검증을 위해 800회의 샘플에 대해 수행된 Level III 신뢰성해석(LHS)의 결과는 3.0327로 수렴되었으며, 파괴확률은 1.2119×10^{-1} %로 나타났다. FORM 결과와의 상대오차는 약 3.11 %로 산정되었고, 허용할 수 있는 오차에 대한 기준은 모호하나 신뢰성해석의 검증과 관련된 기존 연구를 통해 허용 오차에 대해 판단하였다. Kim and Yoon(2009)은 케이슨식 안벽에 대해 신뢰성해석을 수행하여 Crude MCS를 기준으로 중요도추출법(IS, Importance sampling)을 비교 분석하였다. 기존 연구에서 기준과의 상대오차는 약 9.5 %로 본 연구에서 발생한 상대오차 3.11%보다 높으며, 상대적으로 적은 오차를 갖는 제안 방법이 적용 가능함을 판단하였다.

제안된 방법의 소요시간이 추출법에 비해 2일 13시간 단축되었음을 확인할 수 있었으며, 해석시간 및 상대오차로부터 본 연구에서 제안한 방법이 매우 효율적임을 알 수 있다. 그러나 제안된 방법을 적용한 수치예제는 동특성의 변화에 따른 동적 증폭효과가 민감하지 않은 경우로써 그 반대의 경우에 대해서는 충분한 검토 후에 사용되어야 할 것이다.

기존의 신뢰성해석 방법과 본 연구에서 제안된 방법을 비교함으로써 피크응답계수의 영향을 확인하였다. Table 7로부터 알 수 있듯이 신뢰도지수의 차이는 약 0.7795로써 24.9288%의 상대오차를 보였다. 또한 추출법과 비교했을 때 동적 효과를 고려한 Case 1과 Case 2는 상대오차는 각각 3.1061%와 22.597%로 기존 방법보다 제안된 방법이 비교적 정확함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 동특성에 따라서 응답의 축소 또는 증폭 현상이 발생하므로 이는 동적 효과를 고려해야만 하며, 앞서 언급한 기존의 정적응답 기반 해석 방법이 적합하지 않으므로 제안된 방법을 사용함으로써 합리적인 결과를 얻을 수 있음을 보여주었다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(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 Platform Working Stress Design. Washington D.C., USA.
- American Institute of Steel Construction (AISC), 1989. Specification for Structural Steel Buildings, Allowable Stress Design and Plastic Design. Chicago, USA.
- Andrzej, S.N., Kevin, R.C., 2000. Reliability of Structures. 2nd Edition, Boca raton, Florida, USA.
- ANSYS Inc, 2009. ANSYS 12.0 User's Guide. Canonsburg, PA, USA.
- Box, G.E., Wilson, K.B., 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. Journal of the Royal Statistical Society, Series B(Methodological), 13(1), 1-38.
- Bucher, C.G., Bourgund, U., 1987. Efficient Use of Response Surface Methods. Universität Innsbruck, Institut für Mechanik.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2005. Engineering Standards Commentaries Port and Harbor Facilities. Korea.
- Goyal, A., Chopra, A.K., 1989. Simplified Evaluation of Added Hydrodynamic Mass for Intake Towers. Journal of Engineering Mechanics, 115(7), 1393-1412.
- Haldar, A., Mahadevan, S., 2000. Reliability Assessment using Stochastic Finite Element. John Wiley, New York.
- Hasofer, A.M., Lind, N.C., 1974. Exact and Invariant Second-moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics division, 100(1), 111-121.
- 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.
- Khuri, A.I., Cronell, J.A., 1987. Response Surfaces: Design and Analysis. Dekker, New York, NY, USA.
- Kim, D.H., Yoon, G.L., 2009. Application of Importance Sampling to Reliability Analysis of Caisson Quay Wall. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 21(5), 405-409.
- Lee, D.Y., Im, S.W., 2011. Technical Aspects for Development of Offshore Wind Power Substructure. Journal of Korean Society of Steel Construction, Special Issues (October).
- Lee, S.G., Kim, D.H., 2011. Reliability Analysis of Pile Type Quaywall using Response Surface Method. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(6), 407-413.
- Lee, S.G., Kim, D.H., 2014. Reliability Analysis Offshore Wind Turbine Support Structure Under Extreme Ocean Environmental Loads. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(1), 33-40.
- Lee, G.N., Kim, D.H., 2015. Seismic Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine Support Structure. Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(5), 342-350.
- Rackwitz, R., Fiessler, B., 1978. Structural Reliability under Combined Random Load Sequences. Computers and Structures, 9(5), 489-494.
- Reese, L.C., Van Impe, W.F., 2007. Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading. Taylor&Francis, Boca Raton.
- Schuëller, G.I., Bucher, C.G., Bourgund, U., Ouypornprasert, W., 1987. On Efficient Computational Schemes to Calculate Structural Failure Probabilities. Stochastic Structural Mechanics, Springer Berlin Heidelberg. 388-410.
- Yi, J.H., Kim, S.B., Yoon, G.L., Andersen, L, V., 2015. Influence of Pile-Soil Interaction on the Dynamic Properties of Offshore Wind Turbines Supported by Jacket Foundations. Proceedings of the 2015 International Ocean and Polar Engineering Conference, 285-288.
- Yoon, G.L., Kim, K.J., Kim, H.Y., 2013. Reliability Analysis of Monopile for a Offshore Wind Turbine using Response Surface Method. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33(6), 2401-2409.
- 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. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 34(5), 1489-1504.