

## 응답면 기법을 이용한 해상풍력용 모노파일의 신뢰성 해석

윤길림\* · 김광진\*\* · 김홍연\*\*\*

Yoon, Gil Lim\* · Kim, Kwang Jin\*\* · Kim, Hong Yeon\*\*\*

### Reliability Analysis of Monopile for a Offshore Wind Turbine Using Response Surface Method

#### ABSTRACT

Reliability analysis with response surface method (RSM) was performed for a offshore wind turbine (OWT) monopile, which is one of mostly used foundations under 25m seawater depth in the world. The behaviors of a real OWT monopile installed into sandy soils subjected to offshore environmental loads such as wind and wave were analysed using reliability design program (HSRBD) developed in KIOST. Sensitivity analysis of design variables for a OWT monopile with 6m diameter showed that the larger in pile diameter the smaller in probability of failure ( $P_f$ ) of a horizontal deflection and a rotational angle at a pile top, but at a greater than 7m of pile diameter, the reduction rate of  $P_f$  was almost constant. It is a necessary that appropriate local design criteria should be designated as soon as possible because there were significant differences on horizontal deflections;  $P_f$  was 60% at a minimum criteria 15mm deflection, however, 1.5%  $P_f$  when 60mm deflection using 1% of pile diameter from local design criterion standard. Finally, friction angle of sand among many design variables was found most influential design factor in OWT monopile design, and a sensitivity analysis is found an important process to understand which design variables can mostly reduce  $P_f$  with a optimum design for maintaining OWT stability.

**Key words :** Monopile foundation, Response surface method, Reliability analysis, Offshore wind turbine, Importance sampling

#### 초 록

응답면 기법(RSM)을 이용하여 해상풍력(OWT) 모노파일에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 모노파일은 해수면으로부터 15m 깊이에 설치되고 사질토에 근입되는 조건으로 고려하였다. 풍하중 및 파랑하중과 같은 해양환경하중이 작용하는 OWT 모노파일에 대한 신뢰성 해석은 KIOST에서 개발된 신뢰성 해석프로그램인 HSRBD를 이용하였다. OWT 모노파일(직경 6m)의 설계변수에 대한 민감도 분석을 수행한 결과 파일직경이 증가할수록 파일두부에서의 수평변위 및 회전각에 대한 파괴확률은 감소하나 직경이 7m 이상이 되는 경우 파괴확률의 감소율은 작아져 거의 일정해지는 것으로 나타났다. 한편, 국내기준 가운데 파일직경의 1%를 허용수평변위(60mm)로 적용하는 경우 파일의 파괴확률은 1.5%이나 최소기준인 15mm로 고려하는 경우 파괴확률은 60%로 큰 차이가 발생하므로 이에 대한 적절한 설계기준의 정립이 요구된다. 마지막으로 OWT 모노파일의 다양한 설계변수 가운데 기초지반(사질토)에 대한 내부마찰각의 불확실성이 큰 경우 이것이 파일거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 민감도 분석결과는 최적설계와 파괴확률 감소를 위해 어떠한 절차가 필요한지를 보여준다.

**검색어 :** 모노파일, 응답면 기법, 신뢰성 해석, 해상풍력, 중요도 추출법

\* 정희원 · 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부 영년직연구원 (glyoon@kiost.ac)

\*\* 컴택리서치 대표 (info@comtcresearch.co.kr)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 삼부토건(주) 기술연구실 선임연구원 (Corresponding Author · Sambu Construction Co. · hykim74@sambu.co.kr)

Received April 8, 2013/ revised June 28, 2013/ accepted August 13, 2013

## 1. 서론

탄소배출권 제한과 신재생 에너지 개발이 범 지구적인 화두가 됨에 따라 풍력발전시설 건설에 대한 관심과 연구가 확대되고 있다. 특히, 우리나라의 경우 국토면적이 좁은 반면 해양공간 활용에 매우 유리한 입지를 가지고 있어 해상 풍력발전 도입에 대한 관심이 크다. 해상환경은 비교적 고밀도의 바람에너지가 안정적으로 공급되고 소음공해와 전파장애 등 민원문제도 없어 발전시설의 건설과 운영에 우려되는 제한이 매우 적기도 하다. 해상에 풍력발전시설을 건설할 때 나셀, 블레이드 및 타워 등 상부구조의 자중과 풍하중 및 파랑하중, 가동에 따른 모멘트 등 발생하는 외력에 저항하기 위해 해저지반에 설치되는 기초공법의 종류도 현재까지 많이 개발되어 왔다. 이러한 기초공법은 주로 경제성과 안정성을 극대화하는 측면에서 수심, 해저지반 상태, 타워의 높이 등과 연관되어 분류되고 설계에 활용되었다.

해상풍력 구조물을 시공하여 운용하는 경우에 육상에 설치되는 구조물과는 그 환경조건이 매우 다르므로 기초공법도 균질토층의 파일기초 이외에 중력식, 자켓식, 모노파일식, 석선파일식 등 다양한 형식으로 개발되었다. 그리고 최근에는 고효율-대용량의 풍력터빈 개발이 계속적으로 이루어짐에 따라서 적용되는 기초공법도 보다 내하 지지력이 큰 형식으로 대형화 되어가고 있다. 특히, 해상풍력 하부기초는 안정성 및 경제성 측면에서 설계기술의 정도가 높고 경제적으로 최적화하기 위한 방향으로 변화하고 있는 추세이다. 해상풍력 건설의 많은 경험을 가지고 있는 덴마크와 영국 등 유럽, 석유시추 등 해상구조물 구축에 오랜 노하우를 가진 미국을 중심으로 한계상태 설계법에 근간한 설계기준이 개발된 것도 그 일환이라 하겠다.

한편, 다양한 기초형식 중 모노파일 기초는 다른 기초형식과 비교할 때 형태가 단순하고 시공이 비교적 간편하여 해상시공에 유리하며 경제성이 뛰어난 장점을 갖고 있어 해상풍력 기초구조물로 많이 사용되고 있다. 모노파일의 해석에 있어 해저지반의 강성을 고려하지 않는 지반고정식보다 해저지반의 강성을 고려하는 가상 고정식과 등분포 스프링식이 보다 큰 휨모멘트 저항을 갖기 때문에 안전한 설계를 할 수 있다(Emmanuel et al., 2008). 또한, 풍력터빈 블레이드의 회전운동과 고유진동에 의해 기초구조물이 관입된 해저지반에서는 반복하중이 작용하게 됨에 따라 그 영향으로 하부기초인 말뚝의 지지력에 미치는 지반반력계수가 감소하는 경향이 있다(Krolis, 2007).

본 연구에서는 해상풍력 기초공법 가운데 25m 이하의 수심에서 비교적 많이 활용되고 있는 모노파일의 해석을 위하여 국외에서 개발된 풍력터빈의 실제 모델을 선정하고 그에 따른 자중 및 운용환경을 고려하여 적용이 가능한 임의의 지반조건 하에서 신뢰성

해석을 통하여 모노파일의 거동을 확률론적으로 분석하였다.

## 2. 본 논문의 수치해석 기법

신뢰성 해석기법의 종류는 설계자의 편의성을 고려하여 가장 단순화된 방식을 취하는 부분계수법(레벨 1 수준)에서부터 한계상태함수의 평균치 또는 파괴점 부근에서 근사해를 찾는 근사화 방법(레벨 2 수준), 그리고 함수를 근사화하지 않고 직접 적분하거나 수많은 난수를 생성시켜 파괴가 일어나는 경우의 수를 찾는 추출법(레벨 3 수준)에 이르기 까지 매우 다양하다. 본 연구에서는 그 가운데 근사화 방법과 추출법을 이용하여 파괴확률을 산정하였다.

### 2.1 응답면 기법

현재까지 파일의 수평거동은 p-y 곡선에 의해 해석함이 가장 합리적이라 알려져 있으며, 이러한 비선형 p-y 거동해석은 유한요소법(FEM)에 의해 이루어진다. 그런데 그로부터 얻을 수 있는 종속변수인 변위나 회전각 등 성능변수의 한계상태함수는 음함수(implicit function)의 형태이므로 직접 한계상태함수로 신뢰성 해석을 수행하기는 복잡하고 많은 시간이 요구된다. 한편, 응답면 기법(response surface method; RSM)을 이용하면 음함수 형태의 한계상태함수를 양함수(explicit function)의 형태로 근사화가 가능하고 얻어진 양함수를 이용하면 기존의 방법으로 해석이 가능하다.

한계상태함수를 근사화할 때 근사화된 한계상태함수  $\tilde{g}(x)$  즉, 응답면 형태의 결정은 실제 한계상태함수  $g(x)$ 의 형태와 그 비선형성을 감안해야 한다. 음함수 형태에서는 대개  $g(x)$ 를 알 수 없으므로 현재까지 응답면은 광범위한 문제들에 걸쳐 적용할 수 있도록 일반적인 형태로 개발된다. 가장 일반적인 형태는 다음과 같은 2차 다항식이다(Faravelli, 1989).

$$\tilde{g}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (1)$$

여기서,  $x_i$ 와  $n$ 은 확률변수와 그 개수이고,  $a$ ,  $b_i$  및  $c_i$ 는 응답면의 형태를 나타내기 위한 계수이다. 만약,  $\tilde{g}(x)$ 가  $g(x)$ 보다 훨씬 높은 차수를 갖게 된다면 비정상적인 식이 도출될 수 있을 뿐 아니라 표본점(sample point) 영역 밖에서  $\tilde{g}(x)$ 와  $g(x)$  사이에 큰 차이가 나타날 수 있으므로 대개 높은 차수의 다항식은 사용하지 않는다. 비록 2차 다항식을 사용함이 물리적 타당성은 부족하더라도 그것이 하나의 설계점(design point)을 쉽게 확인할 수 있도록 하는 단순하고 얻기 쉬운 매끄러운 면(surface)을 제공해 준다. 이는 특히 근사화된 한계상태면 상에 설계점을 위치시키는 응답면 근사화의 반복적인 설계와 근사화된 한계상태면 상에서 FORM과

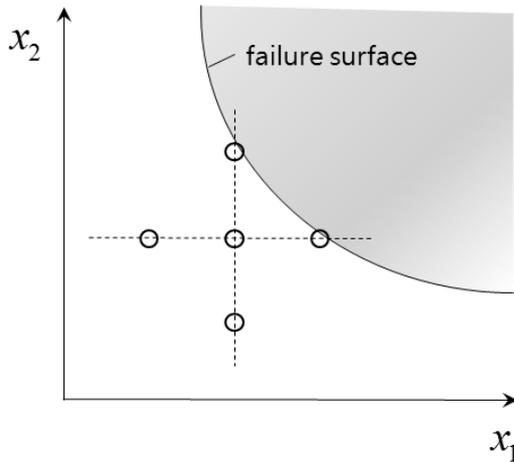


Fig. 1. Schematic of a Sample Method

SORM을 적용하는데 유용하다. 식에서  $a$ ,  $b_i$  및  $c_i$ 는  $2n+1$ 개의 미지의 계수이다. 이들 계수 값은 실제 한계상태함수  $g(x)$ 로부터 일련의 표본점을 이용하여 특이값 분해(singular value decomposition)를 통해 결정할 수 있다. 표본점의 수는 적어도 계수의 수와 같거나 커야한다. 다양한 샘플링 방법이 있지만 통상적으로 그림에 나타난 바와 같이  $\mu_i$ 과  $\mu_i \pm h\sigma_i$ 의  $2n+1$ 개 조합에서  $g(x)$ 를 평가한다. 여기서,  $\mu_i$ 와  $\sigma_i$ 는  $x_i$ 의 평균과 표준편차이고  $h$ 는 임의의 계수이다. 실제 한계상태의 비선형성을 보다 정확하게 근사화하기 위하여 다음과 같이 2차 다항식에 혼합 항이 포함되기도 한다(Khuri et al., 1996).

$$\tilde{g}(x) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

이렇게 근사화된 2차방정식 형태의 응답면 함수를 이용하면 기존의 일계신뢰도법(FORM)을 이용하여 신뢰성 해석이 가능하게 된다.

### 2.2 중요도 추출법

대표적인 추출법(또는 시뮬레이션 기법)인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation; MCS)은 확률변수 발생빈도가 상대적으로 낮아질 경우 즉, 파괴확률이 작은 경우 정확한 파괴확률 추정을 위해 상당한 모의횟수가 필요하게 되며 그에 따라 많은 시간이 필요하게 된다.

한편, 중요도 추출법(importance sampling; IS)은 확률변수의 발생이 파괴면 주위에서 많이 일어나도록 추출(sampling)에 사용하는 확률밀도함수를 조정함으로써 모의횟수 및 시간을 단축시킬 수 있는 방법이다(Bucher et al., 1987).

주어진 확률분포  $p(x)$ 를 갖는 일련의 샘플  $x_i$ 를 가정하면, Eq. (3)에서  $f(x)$ 의 기대치의 형식은 Eq. (4)와 같이 그 샘플들로부터 산정된  $f(x)$ 의 평균으로 근사화할 수 있다. 여기서는 표기상 편의를 위하여 기대치를 대표하여  $I[f]$ 를 사용한다.

$$I[f] = E_p[f(x)] = \int f(x)p(x)dx \quad (3)$$

$$\simeq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \quad (4)$$

주어진  $x$ 에서  $p(x)$ 의 값을 평가는 할 수 있지만, 산정에 필요한 분포로부터 샘플을 추출하기는 쉽지 않다. 대신에 샘플  $x_i$ 를 추출할 일명 표본분포(sampling distribution)라는 또 다른 분포  $q(x)$ 를 도입한다.

$$I[f] = \int f(x) \frac{p(x)}{q(x)} q(x) dx$$

$$\simeq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p(x_i)}{q(x_i)} f(x_i)$$

$$\hat{I}[f] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{w} f(x_i), \quad \tilde{w} = \frac{p(x_i)}{q(x_i)} \quad (5)$$

중요도 추출법의 기본 개념은  $p(x)$ 와는 다르지만 유사한 분포, 소위  $q(x)$ 로부터 샘플을 추출한 다음 잘못된 분포에서의 샘플링으로 도입된 편향(bias)을 보정하기 위하여 얻어진 식을 수정하는 것이다. 한 점에서  $p(x)$ 를 평가할 수 있다고 가정하였으므로 Eq. (5)를 통하여 주어진  $x_i$ 에 대하여 편향을 수정하거나 중요도 가중치  $\tilde{w}$ 를 정확히 결정할 수 있다.

실제로  $p(x)$ 나  $q(x)$ 는 종종 비정규화된(unnormalized) 즉,  $p(x) = \frac{1}{Z_p} \tilde{p}(x)$  및  $q(x) = \frac{1}{Z_q} \tilde{q}(x)$  형태가 되며,

$$\tilde{w} = \frac{p(x_i)}{q(x_i)} = \frac{Z_q \tilde{p}(x_i)}{Z_p \tilde{q}(x_i)}$$

여기서,

$$\frac{Z_p}{Z_q} = \frac{\int \tilde{p}(x) dx}{\int \tilde{q}(x) dx} = \int \frac{\tilde{p}(x)}{\tilde{q}(x)} q(x)$$

$$\simeq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\tilde{p}(x_i)}{\tilde{q}(x_i)} \quad (6)$$

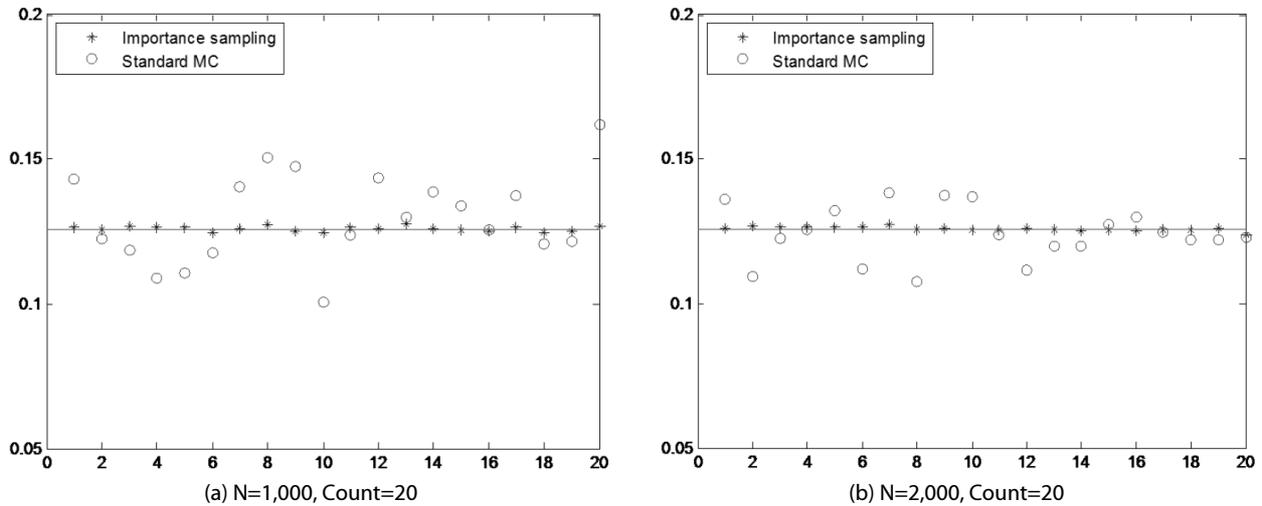


Fig. 2. Comparison of Errors Between MCS and IS (Nicholas, 2010)

이고, Eq. (6)에서는 정규화 계수(normalization factor)를 산정하기 위하여  $q(x)$ 로부터 얻은 샘플을 이용하였다. 만약, 중요도 가중치를  $w_i$ 로 재정의 한다면 두 가지 형태의 근사화로 나타낼 수 있고, 여기서 Eq. (8)은 단순히 Eq. (5)에서 유도된 근사치이다.

$$\hat{I}_1[f] = \sum_{i=1}^N w_i f(x_i), \quad w_i = \frac{\tilde{p}(x_i)/\tilde{q}(x_i)}{\sum_{k=1}^N \tilde{p}(x_k)/\tilde{q}(x_k)} \quad (7)$$

$$\hat{I}_2[f] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p(x_i)}{q(x_i)} f(x_i) \quad (8)$$

Eq. (7)은  $q(x)$ 의 확률분포가 두 번 근사화된 근사치임에 주목할 필요가 있다(주요 항에서 한번, 그리고 Eq. (6)에서 중요도 가중치를 정규화하기 위하여 한번). 이러한 근사화는  $p(x)$ 나  $q(x)$ 가 정규화 된다는 보장이 없을 때 중요하다. 근사식 (8)의 두 번째 항은 두 분포가 정규화됨을 전제하고 통상 기대치에서  $E\{f - \hat{I}_1[f]\} = 0$ 인 경우를 제외하고는 본래의 값과 같지 않게 된다.

결론적으로 파괴확률은 Eq. (5)와 같이 파괴가 발생하는 구간 내에서 확률밀도함수를 적분함으로써 얻을 수 있다. 중요도 추출법에서는  $q(x)$ 를 도입함으로써 파괴확률을 구하게 된다.  $q(x)$ 는 파괴면상의 값(설계점)을 평균으로 하는 가상의 확률밀도함수이며, 이 값은 FORM 등의 근사해법을 이용하여 얻을 수 있다. 그림은 MCS와 IS의 정밀도를 비교한 예로서 가로축은 모의횟수, 세로축은 확률을 나타낸다. 상대적으로 모의횟수(N)에 관계없이 IS의 오차가 적게 나타나며, 추출수(N)가 많을수록 정도가 향상됨을 알 수 있다.

### 3. 해상풍력 모노파일의 신뢰성 해석

#### 3.1 해석조건

해상조건에서 풍력터빈 구조물 기초의 안정성을 확률론적으로 분석하기 위하여 최근 Jonkman et al.(2009)이 해상시스템에 적용할 목적으로 개발한 5MW 규모의 풍력터빈 제원을 이용하였다. 개발된 풍력터빈은 나셀, 블레이드, 타워 및 기초직경의 제원이 제시되어 있다.

Table 1. Condition of Reliability Analysis

Turbine	Capacity	5MW (3-Blades)
	Hub height	88m
Foundation	Type	Steel monopile
	Diameter	D=6.0m, t=60mm
	Length	L=50m
	Projection	Hs=15m
Ground	Soil	Dense sand
	Properties	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ $\phi = 35^\circ$
	Water depth	15m
Loads	Vertical	Rotor : 1,100 kN Nacelle : 2,400 kN Tower : 3,475 kN Total : 7,000 kN
	Horizontal	Wind : 1,000 kN Wave : 1,000 kN Total : 2,000 kN
	Moment	88,000 kN · m (by Wind load)

따라서, Table 1과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 기초설계에 필요한 연직하중은 터빈구조물의 제원으로부터 산출하였고 수심, 수평 작용력과 지층조건은 임의로 가정하되 수평 작용력은 Bush et al.(2009)이 적용한 수평하중을 인용하였다. 특히, 기초지반은 조밀한 모래가 해저면으로부터 35m 이상의 심도에 존재하고 수심은 15m가 유지되는 것으로 가정하였다.

확률론적 해석에서 작용력(자중, 외력 등)과 저항요소(재료특성 등)의 불확실성 정량화는 매우 중요하다. 특히, 그 중에서도 확률분포와 변동성은 해석결과에 주요하게 영향을 미치는 인자이다. 확률론적 해석에 적용한 확률변수들과 그 특성을 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 여러 가지 설계변수 가운데 하중으로서 수평력과 모멘트, 저항요소로서 파일의 탄성계수와 지반의 내부마찰각을 확률변수로 취급하였다. 모든 확률변수의 분포는 정규(normal)분포를 따르고 Table 2에 나타난 바와 같이 5~15%의 불확실성을 가지는 것으로 가정하였다.

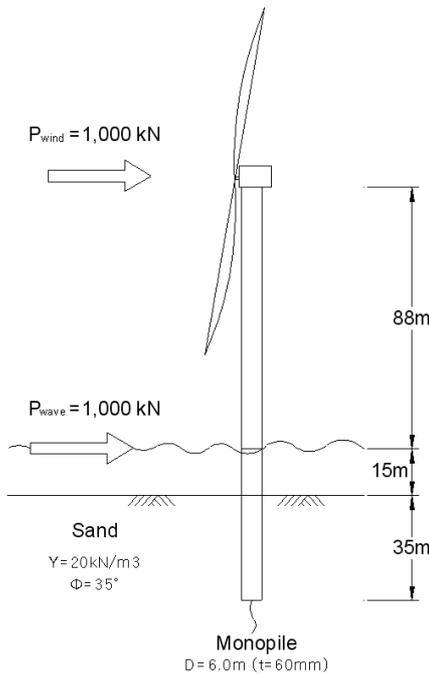


Fig. 3. Section Layout

Table 2. Characteristics of Random Variables

Random variable	Probability distribution	Characteristic value	COV
Horizontal force	Normal	2,000 kN	0.10
Moment	Normal	8,800 kN · m	0.10
Elastic modulus of pile	Normal	210 GPa	0.05
Angle of internal friction of soil	Normal	$\phi = 35^\circ$	0.15

### 3.2 신뢰성 해석과 매개변수 분석

모노파일의 두부 수평변위에 대한 파괴확률 또는 신뢰도지수를 계산하기 위하여 응답면 기법(RSM)과 중요도 추출법(IS)을 이용하였다. IS는 응답면 주변에서 10,000개의 난수를 생성하여 한계상태함수를 계산한 후 파괴확률을 산정하였고 계산된 한계상태함수 값들의 변동성이 0.01% 이내가 될 때까지 반복하여 정밀도를 확보하였다.

신뢰성 해석은 한국해양과학기술원에서 개발한 신뢰성 설계 프로그램 HSRBD ver3.1(2013)을 이용하였다. HSRBD(Harbor Structure Reliability Based Design)은 p-y 모델을 이용하여 말뚝의 신뢰성 설계가 가능한 프로그램으로서, 말뚝 이외에도 방파제와 안벽, 호안 등 항만구조물을 허용응력 및 신뢰성 기법을 이용하여 해석할 수 있는 모듈을 갖추고 있다. 신뢰성 해석기능은 부분안전계수법(레벨 1)으로부터 FORM, RSM의 레벨 2 및 MCS 및 IS를 포함한 레벨 3까지 다양하게 해석이 가능하다.

본 연구에서 다루는 모노파일 구조물은 모래지반에 설치되는 파일기초로서 가상 고정식 내지는 등분포 스프링식 해석모델을 이용하므로 p-y 곡선을 이용하여 변위와 회전각을 계산하게 된다. 따라서, 여기서는 사질토 지반에서 p-y 모델로 많이 사용되는 API(2005) 방법과 쌍곡선 모델(Dewaikar et al., 2006)을 적용하였다.

허용응력 설계법에서 파일 두부의 수평변위와 회전각에 대한 안전여부는 각각 허용변위 및 허용 회전각 기준과 계산된 수평변위 및 회전각을 비교하여 판단한다. 따라서, 한계상태함수는 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서,  $\delta_{max}$ 와  $\theta_{max}$ 는 각각 외력에 의해 발생하는 수평변위와 회전각이고  $\delta_a$ 와  $\theta_a$ 는 허용 수평변위 및 회전각으로서 과거 연구사례(DNV, 2007; Kuo et al., 2008)를 참고하여  $\delta_a = 60mm$ ,  $\theta_a = 0.3^\circ$ 로 설정하였다.

$$g_1 = \delta_a - \delta_{max} \tag{9}$$

$$g_2 = \theta_a - \theta_{max} \tag{10}$$

응답면 기법을 적용하기 위하여 Eqs. (9) and (10)의 한계상태함수를 응답면 함수로 변환하면 다음과 같다. 여기서,  $\phi_{sand}$ 는 모래의 내부마찰각,  $E_p$ 는 파일의 탄성계수이고  $C_n$ 은 구조해석을 통하여 회귀분석으로 구해지는 계수이다.

$$g_1(\delta_a, \delta_{max}) = \delta_a - \delta_{max}(\phi_{sand}, E_p) = C_0 + C_1 \phi_{sand} + C_2 E_p + C_3 \phi_{sand}^2 + C_4 E_p^2 + C_5 \phi_{sand} E_p \tag{11}$$

$$g_2(\theta_a, \theta_{max}) = \theta_a - \theta_{max}(\phi_{sand}, E_p) = C_6 + C_7 \phi_{sand} + C_8 E_p + C_9 \phi_{sand}^2 + C_{10} E_p^2 + C_{11} \phi_{sand} E_p \quad (12)$$

응답면 기법(RSM)과 중요도 추출법(IS)을 이용한 해석결과를 Table 3에 비교하였다. 두부 수평변위( $g_1$ )가 회전각( $g_2$ ) 파괴모드에 비하여 신뢰도지수가 작게 산정되어 지배 파괴모드인 것으로 나타났다. API(2005) 기준에 제시된 p-y 함수를 이용한 결과와 비교할 때 쌍곡선(hyperbolic) 함수를 이용한 경우 신뢰도지수는 14~18% 포인트 가량 낮게 산정되었고 이는 구성식의 차이에서 기인한다. RSM과 IS를 이용한 신뢰도지수는 오차가 약 0.3% 이내로 거의 일치하는 결과를 보였다. 이는 IS를 이용한 추출 시 이미 RSM에서 근사화된 파괴점 주변에서 값들을 추출하기 때문인 것으로 판단된다.

Eqs. (9) and (10)의 한계상태함수에 나타났듯이 허용 수평변위와 허용 회전각이 각각의 파괴모드에서 저항에 해당하므로 허용 변위 및 회전각 기준의 설정에 따라 파괴확률은 달라지게 된다. 따라서, 이들을 변화시키며 해석함으로써 계산된 파괴확률의 변화를 관찰하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 허용변위가 15mm에서 100mm 까지 변화할 때 파괴확률은 거의 대수적(logarithmic)으로 감소하는 것을 알 수 있다. 국내의 말뚝설계 시 이용되는 규정 가운데

파일직경의 1%에 해당하는 60mm에서 파괴확률은 약 1.5%인 반면, 최소 기준변위인 15mm로 설정한 경우의 파괴확률은 약 60%로서 매우 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5는 허용 회전각을 0.2~0.6°까지의 범위로 설정할 때의 파괴확률로서 역시 대수적으로 감소하나 그 범위는  $10^{-6} \sim 10^1$ 로 수평변위 파괴에 비하여 매우 작은 범위에서 변화하였다.

모노파일의 직경은 수평지력뿐 아니라 변위 감소효과와 경제성에도 민감한 요소이므로 최적설계에서 파일의 직경은 주요한 고려사항이다. 따라서, 모노파일의 직경을 변화시키며 해석하여 파괴확률 변화를 관찰하였다. Fig. 6에 나타난바와 같이 직경이 증가할수록 파괴확률이 감소하며 그 감소폭은 커져 지배 파괴모드인 수평변위의 경우 7.0m부터는 직경을 증가시켜도 최대 파괴확률의 차이는 0.27% 포인트 이하로 나타남으로써 변위 감소효과가 적어지는 것으로 나타났다. 이는 모래지반에서 모노파일이 일정한 직경이상 확보되면 두부의 응력이 점차 하부로 전이되면서 나타나는 현상으로 판단된다. 아울러, 회전각의 경우는 직경증가에 따라 파괴확률이 급격하게 작아짐으로써 상대적으로 직경변화에 따라 민감함을 알 수 있다.

모노파일의 길이는 기반암층의 심도, 지층분포와 수심 등에 영향을 받으며 경제성에 큰 영향을 미친다. 따라서, 파일의 길이에 따라 파괴확률의 변화를 관찰하였다. Fig. 7에 나타내었듯이 파일의 길이가 증가함에 따라 파괴확률은 감소하고 그 감소폭은 점차 작아진다. 두부 수평변위와 회전각 파괴 모두 파일길이 60m부터 파괴확률의 감소폭은 매우 작아져 그 차이는 약 0.07% 이하로 나타난다. 즉, 파일길이 60m부터는 길이가 증가하여도 변위 감소효과는 미미함을 알 수 있다.

토질정수의 불확실성은 비교적 크나 모래의 내부마찰각에 대한 변동성은 일반적으로 10% 내외인 것으로 알려져 있다. 내부마찰각의 변동성에 따른 민감도를 파악하기 위하여 변동계수(COV)를

Table 3. Comparison of Reliability Index for Reliability Analysis Methods and p-y Models

	Horizontal displacement of head		Rotational angle of Head	
	RSM	IS	RSM	IS
API(2005)	2.1585	2.1648	2.9412	2.9403
Hyperbolic	1.8319	1.8373	2.5796	2.5796

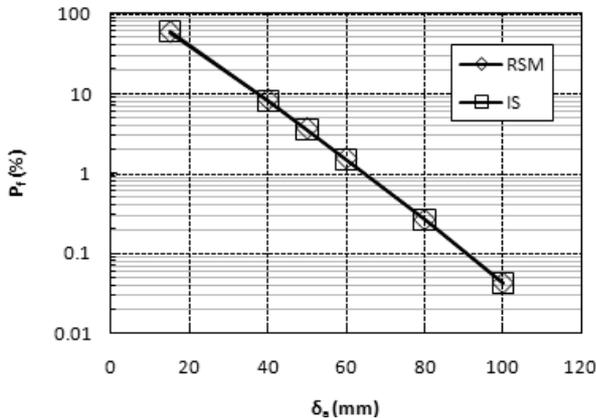


Fig. 4. Variation of Probability of Failure on Allowable Horizontal Deflections

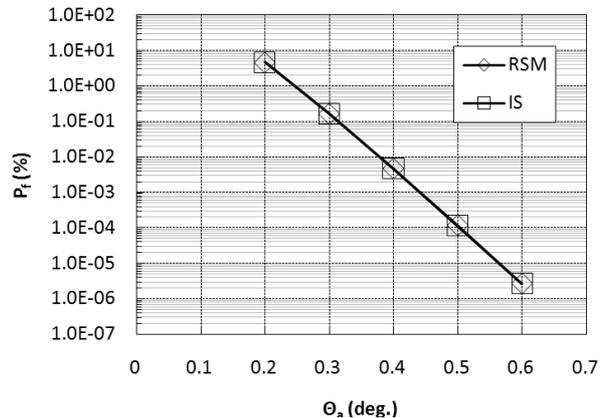


Fig. 5. Variation of Probability of Failure on Allowable Rotation Angle

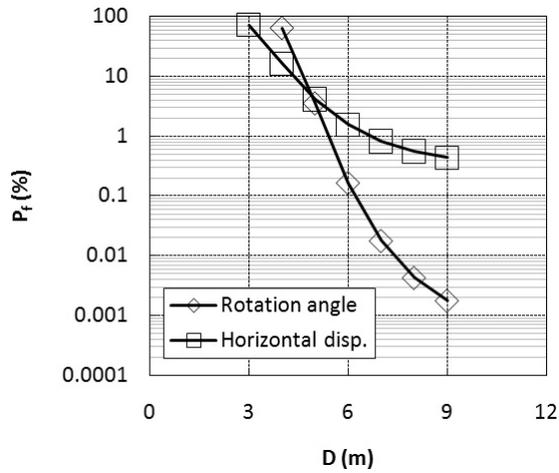


Fig. 6. Variation of Probability of Failure on Monopile Diameter

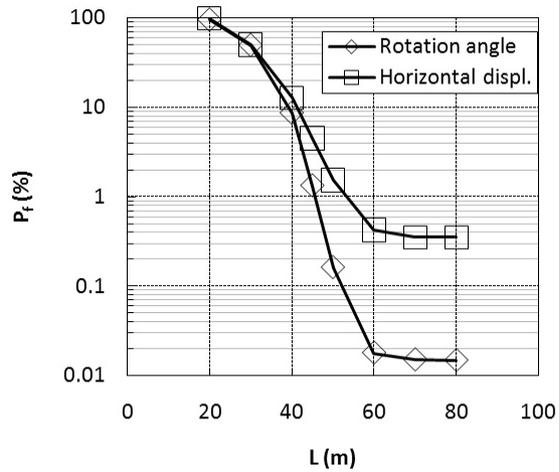


Fig. 7. Variation of Probability of Failure with Varying Mono-pile Length

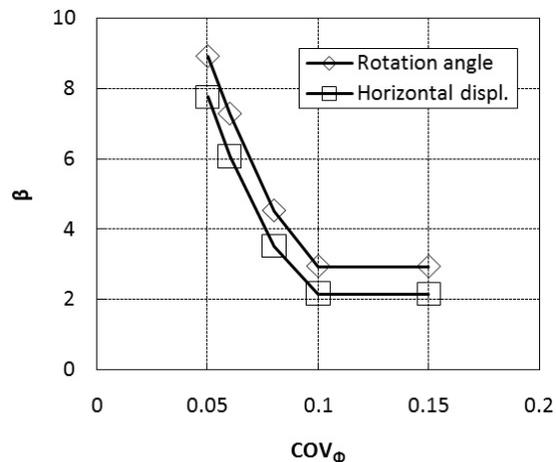


Fig. 8. Variation of Reliability Index on Uncertainty of Internal Friction Angle

감소시키며 해석하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 다른 해석조건은 동일한 상태에서 COV를 당초 15%에서 10%로 감소하여 해석한 결과, 신뢰도지수( $\beta$ )는 약 0.35% 포인트 증가하는데 그쳤다. 반면 10% 이하의 COV 범위에서는 매우 다른 양상을 나타내었다. 즉, 내부마찰각의 COV 8%에서 신뢰도지수 62.6% 포인트 증가, COV 6%에서는 72.5% 포인트 증가하는 등 내부마찰각의 COV 10% 이내에서는 신뢰도지수 상승 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 모래지반에 모노파일 설치되는 경우 내부마찰각의 변동성 수준이 파괴확률과 공사비에 큰 영향요인임을 나타내는 것이다.

### 3.3 확률변수의 민감도 분석

2차식 형태로 근사화된 응답면 함수를 가지고 FORM에 의해 해석하는 과정에서 신뢰도지수와 민감도지수(sensitivity factor)를 얻을 수 있다. Eq. (13)의 신뢰도지수(reliability index,  $\beta$ )와 각 확률변수의 민감도지수( $\alpha_{\bar{X}}$ )의 관계로부터 두 변수의 반복계산을 통하여 일정한 값에 수렴하는  $\beta$ 와  $\alpha_{\bar{X}}$ 를 결정한다(Yoon et al., 2010). 식에서  $\bar{X}$ 는 통계적으로 독립인 확률변수,  $\bar{X}$ 는 표준정규 분포로 선형 변환된 확률변수,  $Z$ 는 한계상태함수를 의미한다. Eq. (13)은 확률변수 사이에 서로 상관성이 없을 때의 관계이며,  $\alpha_{\bar{X}}$ 는 표준화된 공간상의 각 확률변수 축에서 신뢰도지수의 방향여현(direction cosine)을 의미한다.

$$\alpha_{\bar{X}} = \left( \frac{\partial Z}{\partial \bar{X}} \right)_{\bar{X}} / \sqrt{\sum \left( \frac{\partial Z}{\partial \bar{X}} \right)_{\bar{X}}^2} = -\frac{\bar{X}}{\beta} \quad (13)$$

또한, 모든 확률변수의  $\alpha_{\bar{X}}$ 는 Eq. (14)의 관계를 만족하도록 결정해야 한다.

$$\sum (\alpha_{\bar{X}})^2 = 1 \quad (14)$$

민감도지수는 각 확률변수가 파괴확률에 미치는 기여도를 의미하며, 일반적으로 외력의 변수에 대하여 양(+)의 값을, 저항의 변수에 대하여 음(-)의 값을 나타낸다.

Fig. 9에 나타났듯이 본 연구에서 확률변수로 취급한 세 가지 변수 가운데 흙의 내부마찰각에 대한 민감도가 지배적인 것으로 나타났으며 다음으로 외력(수평력 및 모멘트)과 파일의 탄성계수 순이었다. 이는 흙의 내부마찰각이 파괴확률에 미치는 영향이 가장 크므로 설계시 지반조사 및 시험의 정도를 높여 불확실성을 최소화하여야 경제성을 제고할 수 있음을 의미하기도 한다.

각 확률변수의 변동계수를 변화시키며 민감도지수( $\alpha$ )의 변화를 관찰한 결과 Fig. 10에 나타났듯이 내부마찰각에 대한 민감도지수

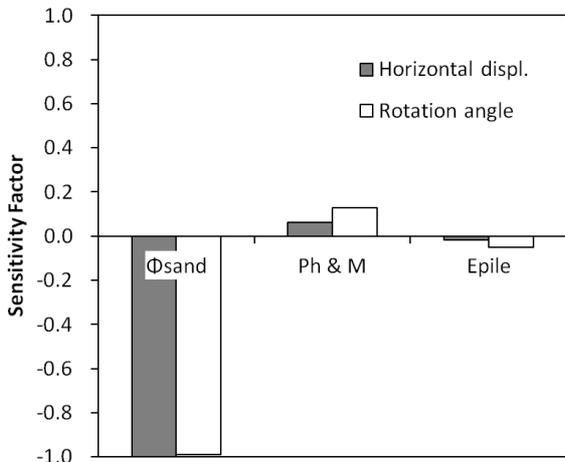


Fig. 9. Sensitivity of Random Variables

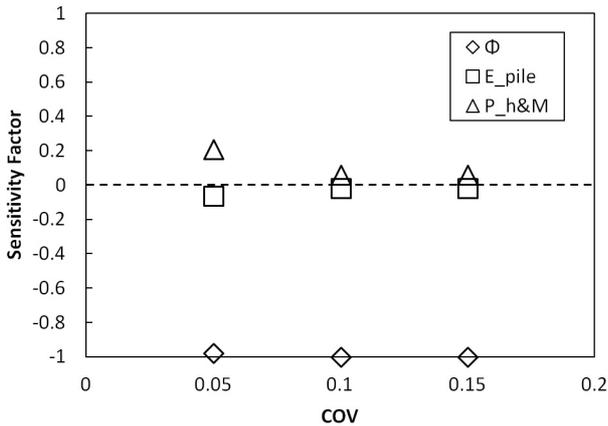


Fig. 10. Sensitivity on Variation of COV

는 1에 가까운 값으로 나타나 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 나머지 확률변수의 경우는 변동성이 작아질수록 저항관련 확률변수는 0으로부터 1로, 하중관련 확률변수는 0으로부터 -1로 근접해 간다. 이는 확률변수의 불확실성이 클수록 파괴확률에 미치는 영향이 큼을 의미한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 국외에서 설계 및 시공된 해상풍력발전 모델을 이용하여 모노파일 하부구조가 모래지반에 설치되는 경우에 확률론적 해석을 통하여 기초의 거동을 파악하고 그 민감도를 분석하였다. 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 허용응력설계법에서 구조물의 안정성 판단기준인 수평변위 및 회전각에 대해 허용치를 증가시키는 경우에 모노파일 기초

의 파괴확률은 대수적으로 감소하였다. 국내 말뚝설계 규정인 파일직경(D=6m)의 1%를 허용수평변위(60mm)로 적용하는 경우 파일의 파괴확률은 1.5%이고 최소기준인 15mm에 대해서는 60%로서 그 차이가 크므로 해상풍력단지에 적용하기 위한 파일의 수평변위 및 회전각에 대한 허용기준의 정립이 시급한 과제인 것으로 평가되었다.

- (2) 모노파일의 직경이 커지면 수평변위 및 회전각에 대한 파괴확률은 감소하나 직경이 7.0m 이상의 경우 점차 수렴하여 파괴확률의 저감효과는 미미하였다. 이는 모래지반에서 모노파일이 일정한 직경이상 확보되면 두부의 응력이 점차 하부로 전이되면서 나타나는 현상으로 판단된다. 아울러 파일직경 변화에 대한 영향은 파일 두부의 수평변위에 비하여 회전각이 보다 큰 것으로 나타났으며 이를 최적설계에 활용할 수 있다.
- (3) 해저면으로부터 기반암층의 심도가 깊어 파일이 모래지반에 근입되는 마찰말뚝인 경우 파일길이가 증가함에 따라 수평변위에 대한 파괴확률은 감소하나 그 감소폭은 작아지며, 파일길이가 일정 근입깊이 이상이 되는 조건, 즉 60m 이상이 되는 경우 수평변위의 감소효과는 작게 평가되었다.
- (4) FORM을 이용한 민감도 분석결과, 변동성이 큰 사질토 지반의 본 사례에서는 흙의 내부마찰각이 파일의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 불확실성이 클 것으로 예측되는 기초지반에서는 정밀한 지반조사뿐 아니라 변동성 분석이 경제성과 안정성을 최적화하는 측면에서 매우 중요한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술원에서 수행중인 기관역량 창의과제 “해상풍력 지지구조 건설기술연구, PE99122”와 산업통상자원부가 지원하고 한국에너지기술평가원이 관리하는 국책과제 “해상풍력 전용 신뢰성 설계 프로그램 개발, PN65510”의 재정적 지원으로 가능했음에 감사드립니다.

#### References

API (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.

Bucher, C. G. and Bourgund, U. (1987). *Efficient use of response surface method*, Report No. 9-87, Institute fur Mechanik, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria.

Bush, E. and Manuel, L. (2009). “Foundation models for offshore wind turbines.” *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando,

- Florida, pp. 1-7.
- Dewaikar, D. and Patil, P. (2006). "A new hyperbolic p-y curve model for laterally loaded piles in soft clay." *Foundation Analysis and Design*, pp. 152-158.
- DNV (2007). *Design of offshore wind turbine structures*, Offshore Standard DNV-OS-J101, Det Norske Veritas, Høvik, Norway, p. 153.
- Emmanuel, F. and Guillaume, C. (2008). "Reservoir flow uncertainty assessment using response surface constrained by secondary information." *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 60, pp. 170-182.
- Faravelli, L. (1989). "Response surface approach for reliability analysis." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 115, No. 12, pp. 2763-2781.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Larsen, T. J., Passon, P., Camp, T., Nichols, J., Azcona, J. and Martinez, A. (2007). "Offshore code comparison collaboration within IEA wind annex XXIII: Phase II results regarding monopile foundation modeling." *2007 European Offshore Wind Conference & Exhibition*, Berlin, Germany, pp. 1-12.
- Khuri, A. I. and Cornell, J. A. (1996). *Response surfaces designs and analyses, second edition*, Marcel Dekker.
- KIOST (2013). *HSRBD ver.3.1 harbour structure reliability based design* (in Korean).
- Krolis, V. (2007). "Foundation design of monopile support structures." *2007 European Offshore Wind Energy Conference*, Nice, France, pp. 1-46.
- Kuo, Y. S., Achmus, M. and Kao, C. S. (2008). "Practical design considerations of monopile foundations with respect to scour." *Global Wind Power*, Beijing, pp. 29-31.
- Nicholas, Z. (2010). *Importance sampling (lecture note)*, Cornell University. pp. 13-14.
- Yoon, G., Yoon, Y., Kim, H. and Kim, B. (2010). "Partial safety factors for geotechnical bearing capacity of port structures." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 156-162 (in Korean).