



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0114180  
(43) 공개일자 2015년10월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G06F 19/00 (2011.01) F03D 11/04 (2006.01)  
G06F 17/40 (2006.01) G06F 17/50 (2006.01)  
G06Q 50/04 (2012.01)  
(21) 출원번호 10-2014-0038437  
(22) 출원일자 2014년04월01일  
심사청구일자 2014년04월01일

(71) 출원인  
군산대학교산학협력단  
전라북도 군산시 대학로 558 (미룡동, 군산대학교)  
(72) 발명자  
김동현  
대전광역시 서구 월평동로 83 다모아아파트 107동 1511호  
이상근  
전라남도 진도군 의신면 중리길 51  
윤길림  
경기도 수원시 영통구 웰빙타운로 20, 가든하임 8301동 101호  
(74) 대리인  
특허법인 다해

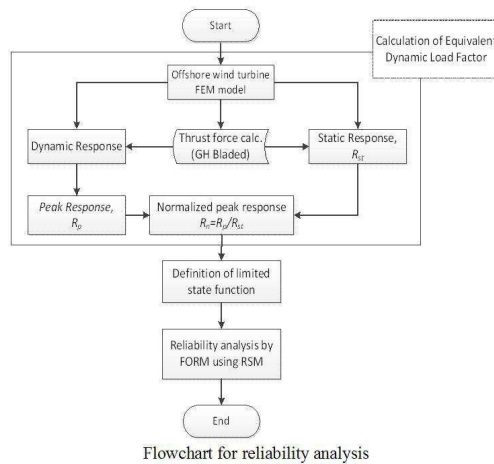
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법 및 이를 기록한 기록매체 및 이를 포함하는 전자 기기

(57) 요약

본 발명은 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 동적 피크응답의 분포를 정적 응답으로 정규화 하여 새로운 확률변수인 동적응답계수를 도입하였으며, 동적응답은 동적응답계수와 정적응답의 곱으로 정의되기 때문에 동적구조해석의 가장 큰 제한사항인 해석시간 문제를 해결한 새로운 개념의 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법에 관한 것이다.

대표도 - 도5



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20123030020110

부처명 지식경제부

연구관리전문기관 한국에너지기술평가원

연구사업명 에너지기술개발사업

연구과제명 해상풍력 지지구조물 신뢰성 해석 및 설계프로그램 개발

기여율 1/1

주관기관 (주)헤인이앤씨

연구기간 2012.11.01 ~ 2015.10.31

---

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

해상 풍력 터빈 구조물 및 상기 해상 풍력 터빈 구조물이 설치되는 지반을 3차원 모델링하는 단계;  
설계조건 정보(X)를 설정하는 단계;

상기 설정된 설계조건 정보(X)를 입력값으로 하여 동적 피크응답( $R_p(X)$ )을 획득하는 단계;

상기 설정된 설계조건 정보(X)를 기반으로 하여 정적 응답( $R_{st}$ )을 획득하는 단계;

상기 정적 응답( $R_{st}$ )을 기준값으로 하여 상기 동적 피크응답( $R_p(X)$ )을 정규화한 동적응답계수( $R_n = R_p/R_{st}$ )를 획득하는 단계;

한계 상태 함수를 수식(1)을 통하여 획득하는 단계;

(수식 1:  $g(X) = R_{all} - R_n R_{st}(X)$  ( $R_{all}$ 은 구조물 응답에 대한 허용치임))

상기 한계 상태 함수를 기반으로 하여 신뢰성 해석을 수행하는 단계;를 포함하는,  
해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법.

**청구항 2**

청구항 1에 있어서,  
상기 설계조건 정보는 지반의 강성, 풍속, 파랑하중 중 적어도 하나 이상인,  
해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법.

**청구항 3**

청구항 1에 있어서,  
상기 신뢰성 해석을 수행하는 단계는, 표준정규분포 확률변수의 공간에서 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리인 신뢰도 지수를 산정하는 일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 이용하여 파괴 확률을 계산하는 것을 특징으로 하는,  
해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법.

**청구항 4**

청구항 2에 있어서,  
상기 파랑하중은 수식(2)를 이용하여 획득하는 것을 특징으로 하는,  
해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법.

(수식 2 :  $f_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |U-W|(U+W) + C_M \rho_w A \frac{BU}{Bt}$  , 여기서,  $C_D$ ,  $C_M$ 은 항력계수와 관성력계수,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도,  $D$ 는 해양부착생물을 포함한 부재의 유효직경,  $A$ 는 수직축에 투영된 부재 단면적,  $U$ 는 부재축 직각방향의 물 입자 속도 성분임)

**청구항 5**

청구항 1에 있어서,  
 상기 지반의 모델링은 비선형 스프링으로 모델링하는 것을 특징으로 하는,  
 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법.

**청구항 6**

청구항 1에 있어서,  
 상기 신뢰성 해석을 수행하는 단계에서, 상기 한계상태함수가 음함수로 존재하는 경우 응답면 기법(Response surface method, RSM)을 이용하여 상기 한계상태함수를 양함수로 근사화하는 것을 특징으로 하는,  
 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법.

**청구항 7**

청구항 1 내지 제 6 항 중 어느 한 항에 기재된 신뢰성 해석 방법을 기록한 기록매체.

**청구항 8**

청구항 1 내지 제 6 항 중 어느 한 항에 기재된 신뢰성 해석 방법을 포함하는 전자기기.

**발명의 설명**

**기술분야**

[0001] 본 발명은 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 동적 피크응답의 분포를 정적 응답으로 정규화 하여 새로운 확률변수인 동적응답계수를 도입하였으며, 동적응답은 동적응답계수와 정적응답의 곱으로 정의되기 때문에 동적구조해석의 가장 큰 제한사항인 해석시간 문제를 해결한 새로운 개념의 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] 해상풍력터빈 지지구조물의 형태는 다양하지만 그 중 시공사례가 많아 비교적 경험적인 지식이 풍부한 Jacket 또는 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 지지구조물의 안전성 확보를 위한 설계를 위해서는 설계변수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 수행해야한다.

[0003] 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 통해 한계상태함수를 정의해야 한다. 그러나 동적 구조해석은 정적해석에 비해 상당한 해석시간을 필요로 하며, 응답면 추정 및 신뢰성해석 과정에서 반복적으로 해석을 수행해야하기 때문에 적용이 어렵다.

[0004] 기존 동적 구조해석기반의 신뢰성해석은 피크응답에 대한 극치분포를 추정함에 있어 해석시간을 단축하기 위한 방법들을 제안하였다. Cheng(2002)은 구조물 동적 피크응답에 대한 확률분포 추정을 위해 Peak-Over-Threshold(POT) 방법을 사용하였으며, 시뮬레이션 시간을 증가시키면서 추정된 확률분포함수 모수의 수렴정도를 판단하여 최소한의 시뮬레이션 시간을 결정하였다.

[0005] 그러나 여기에서는 모두 파랑과 풍속만을 고려하여 신뢰성 해석을 수행하였고, 지지구조물과 연동된 지반물성의 변동성은 고려되지 않았다.

[0006] <선행논문: Cheng(2002)> Cheng P. W., A reliability based design methodology for extreme responses of offshore wind turbines, PhD Thesis, Delft University of Technology; 2002.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0007] 본 발명에서는 해상풍력터빈 지지구조물 신뢰성 해석시 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.

[0008] 따라서 더 많은 설계변수를 확률변수로 고려할 수 있게 되었으며, 파랑 및 풍하중 그리고 지반물성의 변동성을 고려한 5-MW 해상풍력터빈 Jackt 지지구조물에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다

**과제의 해결 수단**

[0009] 본 발명은 상기의 과제를 해결하기 위해 다음과 같은 과제 해결 수단을 제공한다.

[0010] 먼저, 본 발명에 따른 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법은, 다음과 같은 단계를 거쳐 수행한다.

[0011] 해상 풍력 터빈 구조물 및 상기 해상 풍력 터빈 구조물이 설치되는 지반을 3차원 모델링하는 단계;

[0012] 설계조건 정보(X)를 설정하는 단계;

[0013] 상기 설정된 설계조건 정보(X)를 입력값으로 하여 동적 피크응답( $R_p(X)$ )을 획득하는 단계;

[0014] 상기 설정된 설계조건 정보(X)를 기반으로 하여 정적 응답( $R_{st}$ )을 획득하는 단계;

[0015] 상기 정적 응답( $R_{st}$ )을 기준값으로 하여 상기 동적 피크응답( $R_p(X)$ )을 정규화한 동적응답계수 ( $R_n = R_p / R_{st}$ )를 획득하는 단계;

[0016] 한계 상태 함수를 수식(1)을 통하여 획득하는 단계;

[0017] (수식 1:  $g(X) = R_{all} - R_n R_{st}(X)$  ( $R_{all}$ 은 구조물 응답에 대한 허용치임))

[0018] 상기 한계 상태 함수를 기반으로 하여 신뢰성 해석을 수행하는 단계를 포함한다.

[0019] 여기에서, 상기 설계조건 정보는 지반의 강성, 풍속, 파랑하중 중 적어도 하나 이상인 것을 특징으로 한다.

[0020] 상기 신뢰성 해석을 수행하는 단계는, 표준정규분포 확률변수의 공간에서 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리인 신뢰도 지수를 산정하는 일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 이용하여 파괴 확률을 계산하는 것을 특징으로 한다.

[0021] 또한, 상기 파랑하중은 수식(2)를 이용하여 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0022] (수식 2) : 
$$f_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |U-W|(U+W) + C_M \rho_w A \frac{BU}{Bt}$$
, 여기서,  $C_D$ ,  $C_M$ 은 항력계수와 관성력계수,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도,  $D$ 는 해양부착생물을 포함한 부재의 유효직경,  $A$ 는 수직축에 투영된 부재 단면적,  $U$ 는 부재축 직각방향의 물 입자 속도 성분임)

[0023] 상기 지반의 모델링은 비선형 스프링으로 모델링하는 것을 특징으로 한다.

[0024] 상기 신뢰성 해석을 수행하는 단계에서, 상기 한계상태함수가 음함수로 존재하는 경우 응답면 기법(Response surface method, RSM)을 이용하여 상기 한계상태함수를 양함수로 근사화하는 것을 특징으로 한다.

[0025] 본 발명은 또한 상기 신뢰성 해석 방법을 기록한 기록매체 및 상기 신뢰성 해석방법을 포함하는 전자기기를 제공한다.

**발명의 효과**

[0026] 본 발명에 따르면, 동적 피크응답의 분포를 정적 응답으로 정규화 하여 새로운 확률변수인 동적응답계수를 도입하였으며, 동적응답은 동적응답계수와 정적응답의 곱으로 정의되기 때문에 동적구조해석의 가장 큰 제한사항인 해석시간 문제를 해결하는 효과를 제공한다.

[0027] 이를 통해, 더 많은 설계변수를 확률변수로 고려할 수 있게 되었으며, 파랑 및 풍하중 그리고 지반물성의 변동성을 고려한 5-MW 해상풍력터빈 Jackt 지지구조물에 대한 신뢰성 해석이 가능하게 되는 효과를 제공한다.

**도면의 간단한 설명**

[0028] 도 1 내지 도 2는 지지구조물의 동적 피크응답을 보여주는 확률밀도함수이며,  
 도 3은 왜곡된 형태의 확률밀도함수이며,  
 도 4는 확률밀도함수를 표준정규분포 확률변수 공간에 도시한 그래프이며,  
 도 5는 정적/동적 구조해석 결과를 이용한 신뢰성해석 과정을 흐름도이며,  
 도 6은 Block maxima와 POT 방법의 샘플링 예를 나타낸 그림이며,  
 도 7은 Saturated Design 에 의한 구조해석점을 확률변수 공간에 도시한 그림이며,  
 도 8은 4-Leg Jacket 구조로 이루어진 지지구조물의 모습이며,  
 도 9는 3개의 다층 지반의 모습이며,  
 도 10은 도 8 내지 도 9의 방식에 따라 계산된 P-y 곡선이며,  
 도 11은 범용 유한요소해석 프로그램인 Ansys 12.0을 사용하여 유한요소 모델한 그림이며,  
 도 12는 지반부분에 사용된 비선형 스프링은 1m 간격으로 모델링하여, 고유치의 해석 결과 모드 형상이며,  
 도 13은 1시간 동안 시뮬레이션을 통해 계산된 추력을 나타낸 그림이며,  
 도 14는 해상풍력터빈의 작동상태 및 해상환경조건을 나타내며,  
 도 15는 설계 파랑 및 풍하중에 대한 해상풍력터빈의 동적구조해석결과 mud-line에서의 시간이력 수평변위 응답을 보여주며,  
 도 16은 Block maxima 방법을 사용하여 피크응답에 대한 확률분포를 추정된 결과를 보여주며,

도 17과 도 18은 설계변수( $X$ ) 변화에 따른 동적응답계수( $R^n$ )의 확률밀도함수를 보여주며,  
 도 19는 신뢰성 해석에 사용된 확률변수를 보여주며,  
 도 20은 신뢰성해석을 수행결과의 신뢰도지수이며,  
 도 21은 각 확률변수의 민감도계수(Sensitivity factors) 및 최확과피점(Most probable failure points, MPFP)을 보여준다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0029] 이하 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 대해 구체적으로 살펴보기로 한다.
- [0030] 다만, 본 발명을 설명함에 있어, 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다. 용어가 동일하더라도 표시하는 부분이 상이하면 도면 부호가 일치하지 않음을 미리 말해두는 바이다.
- [0031] 그리고 후술되는 용어들은 본 발명에서의 기능을 고려하여 설정된 용어들로서 이는 실험자 및 측정자와 같은 사용자의 의도 또는 관례에 따라 달라질 수 있으므로 그 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0032] 본 명세서에서 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 및/또는 이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.
- [0033] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다.
- [0034] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가진 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0035] 본 발명은 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 동적 피크응답의 분포를 정적 응답으로 정규화 하여 새로운 확률변수인 동적응답계수를 도입하였으며, 동적응답은 동적응답계수와 정적응답의 곱으로 정의되기 때문에 동적구조해석의 가장 큰 제한사항인 해석시간 문제를 해결한 새로운 개념의 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법에 관한 것이다.
- [0036] 본 발명에서는 동적응답을 기반으로한 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.
- [0037] 본 발명에 따른 해상 풍력 터빈 구조물의 신뢰성 해석 방법은, 다음과 같은 단계를 거쳐 수행한다.
- [0038] 해상 풍력 터빈 구조물 및 상기 해상 풍력 터빈 구조물이 설치되는 지반을 3차원 모델링하는 단계;
- [0039] 설계조건 정보(X)를 설정하는 단계;

[0040] 상기 설정된 설계조건 정보(X)를 입력값으로 하여 동적 피크응답( $R_p(X)$ )을 획득하는 단계;

[0041] 상기 설정된 설계조건 정보(X)를 기반으로 하여 정적 응답( $R_{st}$ )을 획득하는 단계;

[0042] 상기 정적 응답( $R_{st}$ )을 기준값으로 하여 상기 동적 피크응답( $R_p(X)$ )을 정규화한 동적응답계수 ( $R_n=R_p/R_{st}$ )를 획득하는 단계;

[0043] 한계 상태 함수를 수식(1)을 통하여 획득하는 단계;

[0044] (수식 1:  $g(X)=R_{all}-R_nR_{st}(X)$  ( $R_{all}$ 은 구조물 응답에 대한 허용치임))

[0045] 상기 한계 상태 함수를 기반으로 하여 신뢰성 해석을 수행하는 단계를 포함한다.

[0046] 여기에서, 상기 설계조건 정보는 지반의 강성, 풍속, 파랑하중 중 적어도 하나 이상인 것을 특징으로 한다.

[0047] 상기 신뢰성 해석을 수행하는 단계는, 표준정규분포 확률변수의 공간에서 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리인 신뢰도 지수를 산정하는 일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 이용하여 파괴 확률을 계산하는 것을 특징으로 한다.

[0048] 또한, 상기 파랑하중은 수식(2)를 이용하여 획득하는 것을 특징으로 한다.

[0049] (수식 2 :  $f_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |U - W| (U - W) + C_{MP} \rho_w A \frac{BU}{Bt}$ , 여기서,  $C_D$ ,  $C_{MP}$ 은 항력계수와 관성력계수,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도,  $D$ 는 해양부착생물을 포함한 부재의 유효직경,  $A$ 는 수직축에 투영된 부재 단면적,  $U$ 는 부재축 직각방향의 물 입자 속도 성분임)

[0050] 상기 지반의 모델링은 비선형 스프링으로 모델링하는 것을 특징으로 한다.

[0051] 상기 신뢰성 해석을 수행하는 단계에서, 상기 한계상태함수가 음함수로 존재하는 경우 응답면 기법(Response surface method, RSM)을 이용하여 상기 한계상태함수를 양함수로 근사화하는 것을 특징으로 한다.

[0052] 이하 상기 단계에 적용되는 이론에 대해 보다 구체적으로 설명하기로 한다.

[0053] 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.

[0054] 
$$g = R_{all} - R_p(X) \quad (1)$$

[0055] 여기서,  $R_{all}$ 은 구조물 응답에 대한 허용치,  $R_p(X)$ 는 설계변수에 의한 지지구조물의 동적 피크응답이며 일반적인 확률밀도함수 형태는 도 1과 같다.

[0056] 도 1에서  $R_p$ 는 지지구조물의 피크응답을 의미한다. 그러나 지반의 강성, 풍속 등 설계변수(X)에 의해  $R_p$ 의 확률밀도함수는 달라지며, X에 따른 확률밀도 함수는 도 2와 같다.

[0057] 따라서,  $R_p$ 와 X의 결합 확률밀도함수는 식(2)와 같이 정의 될 수 있다.

[0058] 
$$f_{R_p, X}(r_p, x) = f_{R_p|X}(r_p|x) f_X(x) \quad (2)$$



[0059] 도 3은 확률밀도함수  $f_{R_p, X}(r_p, x)$  를 나타낸 것이며, 빗금친 영역은 한계상태함수가 음수가 되는 부분으로 파괴영역에 해당하기 때문에 파괴확률은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_f = \int_{g < 0} f_{R_p, X}(r_p, x) dr_p dx = \int_{A_g} f_{R_p, X}(r_p | x) f_X(x) dr_p dx \quad (3)$$

[0061] 도 3에서 볼 수 있듯이 확률밀도함수가 왜곡된 형태이기 때문에 빗금친 파괴영역을 계산하기에 어려움이 따른다. 이에 파괴확률( $P_f$ )을 쉽게 구할 수 있도록 식(4)와 같이 동적응답계수  $R_n$ 을 정의하였다.

$$R_n = R_p / R_{st} \quad (4)$$

[0063] 여기서,  $R_{st}$ 는 설계조건에서의 정적응답이며, 지반물성 및 파랑, 풍하중 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.

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

[0065]  $R_n$ 과  $X$ 의 결합된 확률밀도함수를 표준정규분포 확률변수 공간에 도시하면 도 4와 같다.

[0066] 표준정규분포 확률변수의 공간에서 원점으로부터 파괴면까지의 최단거리인 신뢰도지수를 산정하는 일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 통해 파괴확률을 계산할 수 있다. Bladed를 통해 추력을 계산하고 정적/동적 구조해석 결과를 이용한 신뢰성해석 과정을 흐름도로 나타내면 도 5와 같다.

[0067] 이하, 동적 피크응답에 대한 분포 추정하는 과정에 대해 설명하기로 한다.

[0068] 지지구조물의 동적 피크응답의 분포함수는 파랑 및 풍하중 등에 의한 동적응답을 분석함으로써 구할 수 있으며, 동적응답으로부터 피크응답의 분포를 추정하는 방법으로는 Block maxima와 Peak-Over-Threshold(POT) 방법이 주로 사용되고 있다. Block maxima 방법은 시간이력응답을 일정 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 도 6에서 볼 수 있듯이 Block maxima 방법에서는 block내부에서 하나의 최대값을 선택하기 때문에 다른 피크값들은 무시된다는 단점이 있지만 Block 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.

[0069] 본 발명에서 의미하는 파랑하중에 대해 설명한다.

[0070] 지지구조물에 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(6)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$f_w = \frac{1}{2} \rho_w C_D D |U - W| (U - W) + C_M \rho_w A \frac{BU}{Bt} \quad (6)$$

[0072] 여기서,  $C_D$ ,  $C_M$ 은 항력계수와 관성력계수,  $\rho_w$ 는 해수의 밀도,  $D$ 는 해양부착생물을 포함한 부재의 유효 직경,  $A$ 는 수직축에 투영된 부재 단면적,  $U$ 는 부재축 직각방향의 물 입자 속도 성분이다. 식(6)을 통한 정적 파랑하중 계산시 물 입자의 속도를 부재 거동에 대한 상대속도로 고려하기 위해 고려된 부재의 속도성분인  $W$ 는 무시된다. 그리고 물 입자 운동에 대한 위상(Phase)은 선형 파랑이론에 근거하여 Sin과 Cos 함수로 정의되며, 파력이 최대가 되는 위상은 식(7),(8)과 같다.

$$\sin\theta_0 = Q \frac{\pi DC_M}{HC_D} \frac{2\sinh^2(ks)}{2kd + \sinh(2kd)} \quad (7)$$

$$\cos\theta_0 = Q \sqrt{1 - \sin^2\theta_0} \quad (8)$$

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

$$p_u = \min \begin{cases} p_{us} = (C_1\chi + C_2D)p_o' \\ p_{ud} = C_3Dp_o' \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $p_u$ 는 지반의 극한지력,  $s$ 와  $d$ 는 각각 얇은 기초와 깊은 기초,  $C_i$ 는 모래지반의 내부마찰각에 의해 결정되는 계수,  $D$ 는 기초 파일의 직경,  $\chi$ 는 해저면을 기준으로 한 깊이,  $p_o'$ 는 유효 흙덮기압이며, 비선형 P-y 관계는 식(10)과 같이 정의된다.

$$P = Ap_u \tanh\left[\frac{k\chi}{Ap_u} y\right] \quad (10)$$

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

이하 응답면 기법(Response surface method, RSM)에 대해 설명한다.

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 응답면 기법을 사용하여 한계상태함수를 양함수로 근사화 할 수 있다. 응답면은 표본점 선정 후 각 표본점에서의 구조해석을 통해 구할 수 있으며, 표본점 선정은 식(11)과 같이 확률변수의 평균 또는 중심으로부터 일정 거리만큼 떨어져 있는 점을 취하는 방법을 사용하였다.

$$X_i = X_i^c + q h_i \sigma_{X_i} I_i \quad (11)$$

여기서,  $X_i^c$ 는 확률변수의 평균 또는 중심이 되는 점으로 매회 갱신되는 파괴점,  $\sigma_{X_i}$ 는  $X_i$ 의 표준편차,  $h_i$ 는 확장폭 그리고  $I_i$  scattering index 이며, Saturated Design 에 의한 구조해석점을 확률변수 공간에 도시하면 도 7과 같다.

이하 본 발명의 수치해석에 대한 내용을 설명하기로 한다.

수치해석은 5-MW급 해상풍력터빈을 대상으로 하였으며, 지지구조물은 도 8과 같이 서남해안의 풍속, 수심 및 파고등을 고려하여 설계된 4-Leg Jacket 구조로 Pin pile을 삽입하여 암반과 그라우팅되는 형태이다.

NREL 5-MW 해상풍력터빈 모델을 참조하였으며, RNA 및 타워 그리고 지지구조물의 질량은 각각 350 ton, 391 ton, 265ton 이다. 지반은 도 9와 같이 3개의 다층지반으로 구성하였고, 이에 따라 계산된 P-y 곡선은 도 10과

같다.

[0087] 범용 유한요소해석 프로그램인 Ansys 12.0을 사용하여 유한요소 모델 및 구조해석을 하였다. Blade 및 Nacelle 은 집중질량으로 고려되었으며, Jacket 및 Tower는 Beam요소를 사용하여 도 11과 같이 모델링 하였다.

[0088] 지반부분에 사용된 비선형 스프링은 1m 간격으로 모델링 되었으며, 고유치 해석 결과 모드 형상은 도 12와 같고, 고유 진동수는 각 각 0.267 Hz, 1.577 Hz로 나타났다.

[0089] 풍하중의 분포를 구하기 위해 Bladed(Bladed Multibody dynamics user manual, Ver. 4.4)를 사용하였으며, 바람장 생성시 IEC 61400-1 CLASS II 등급에 해당하는 설계풍속 42.5m/sec, 난류강도는 0.12 로 설정되었다. 도 13은 1시간 동안 시뮬레이션을 통해 계산된 추력을 나타낸 것이다.

[0090] 추력은 정적 하중으로 고려되었으며, 평균 0.129 MN, COV 0.22 인 정규분포 확률변수이다. 이때 타워에 작용하는 풍하중을 계산하기 위해서는 풍속이 필요하며, 작용하는 추력에 해당하는 풍속은 식(12)을 통해 계산할 수 있다.

[0091] 
$$v = F_V^{-1}(F_{f_n}) \quad (12)$$

[0092] 여기서,  $F_{f_n}$ 는 추력에 대한 누적확률분포함수이고,  $F_V$ 은 풍속의 누적확률분포함수이다.

[0093] 타워에 작용하는 단위 길이당 풍하중은 식(13)과 같이 계산할 수 있다.

[0094] 
$$f_t(z) = \frac{1}{2} \rho_{air} C_t V^2(z) D(z) \quad (13)$$

[0095] 여기서,  $\rho_{air}$ 는 공기의 밀도,  $C_t$ 는 타워의 항력계수,  $V$ 는 풍속,  $Z$ 는 해수면으로부터 높이,  $D$ 는 타워의 직경이다. 그리고 해상풍력터빈의 작동상태 및 해상환경조건을 정리하면 도 14와 같다.

[0096] 설계 과량 및 풍하중에 대한 해상풍력터빈의 동적구조해석을 수행하였다. 시뮬레이션 시간은 1시간이며, mud-line에서의 시간이력 수평변위 응답은 도 15와 같다. 해석에 사용된 PC는 OS Windows7 64bit, CPU Quad core(3.4GHz) 환경이며, 해석에 약 13시간 30분이 소요되었다. 따라서 해상풍력터빈의 신뢰성 해석시 동적 구조 해석을 직접 사용하여 파괴확률을 산정하는 것은 사실상 불가능하다.

[0097] Block maxima 방법을 사용하여 피크응답에 대한 확률분포를 추정하였으며, block 크기는 1분이다. 그 결과 도 16과 같이 Log normal 분포가 적합한 것으로 나타났다.

[0098] 도 17은 설계변수( $X$ ) 변화에 따른 동적응답계수( $R^n$ )의 확률밀도함수를 나타낸 것이며, 확률밀도 함수는 거의 동일한 형태를 유지하는 것을 알 수 있다. 이는 설계변수 변화에 따른 동적피크응답이 크거나 작게 나타날 수 있지만 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.

[0099] 신뢰성 해석에 사용된 확률변수는 도 19와 같다. 동적응답계수는 동적응답의 분석을 통해 Log normal 분포로 고려되었으며, 지반의 단위중량 및 추력은 정규분포, 그리고 지반의 내부마찰각은 상한과 하한이 정해진 Beta분포로 고려되었다.

[0100] 한계상태함수는 식(14)와 같이 mud-line에서 지지구조물의 허용 수평변위를 사용하여 정의하였다.

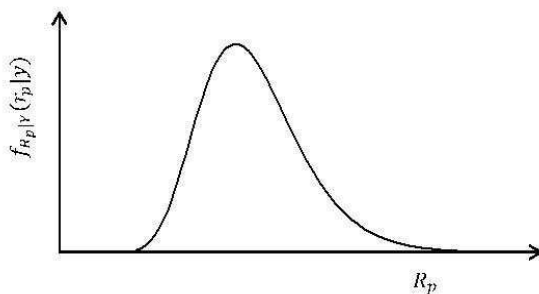
[0101] 
$$g = R_{all} - R_n R_{st} (f_h, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \phi_1, \phi_2, \phi_3) \quad (14)$$

[0102] 허용 수평변위인  $R_{all}$ 은 교량설계에 적용되는 AASHTO LRFD Bridge Design Specification를 준용하여 38mm로 결정하였다.

- [0103] FORM을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였으며, 신뢰도지수( $\beta$ )는 도 20과 같이 약 40번의 반복과정 이후 6.0493으로 수렴되었다. 신뢰도지수의 수렴이 비교적 느린 이유는 내부마찰각이 상한과 하한이 정해져 있는 Beta분포로 고려되었기 때문이다.
- [0104] 각 확률변수의 민감도계수(Sensitivity factors) 및 최확과괴점(Most probable failure points, MPFP)은 도 21과 같다. Table에 나타난 민감도 및 최확과괴점을 통해 알 수 있듯이 동적응답계수가 가장 주요한 요인이며, 그 다음으로 풍하중인 것을 알 수 있다. 그리고 지반 물성 관련 확률변수 중 표층의 지반내부마찰각인  $\phi_1$ 을 제외한 다른 확률변수의 민감도는 매우 작은 것으로 나타났다.
- [0105] 설계변수( $X$ ) 변화에 따른 동적응답계수( $R^n$ )의 확률밀도함수들을 비교한 결과 거의 동일한 형태를 유지하는 것을 알 수 있었기 때문에 본 발명에서는 해상풍력터빈 지지구조물의 동적응답계수( $R^n$ )가 일정하다고 가정하였다.
- [0106] 본 발명에서는 동적응답을 기반으로한 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.
- [0107] 이상 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허 청구의 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

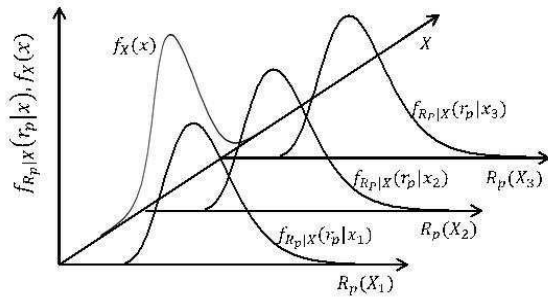
## 도면

### 도면1



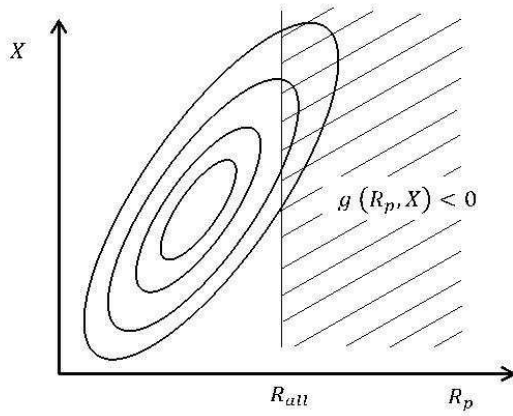
A Typical probability density function of peak response

도면2



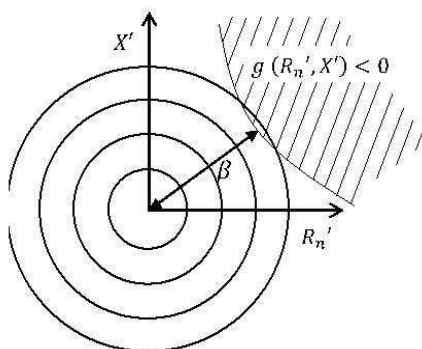
PDFs of  $R_p$  for different  $X$ 's

도면3



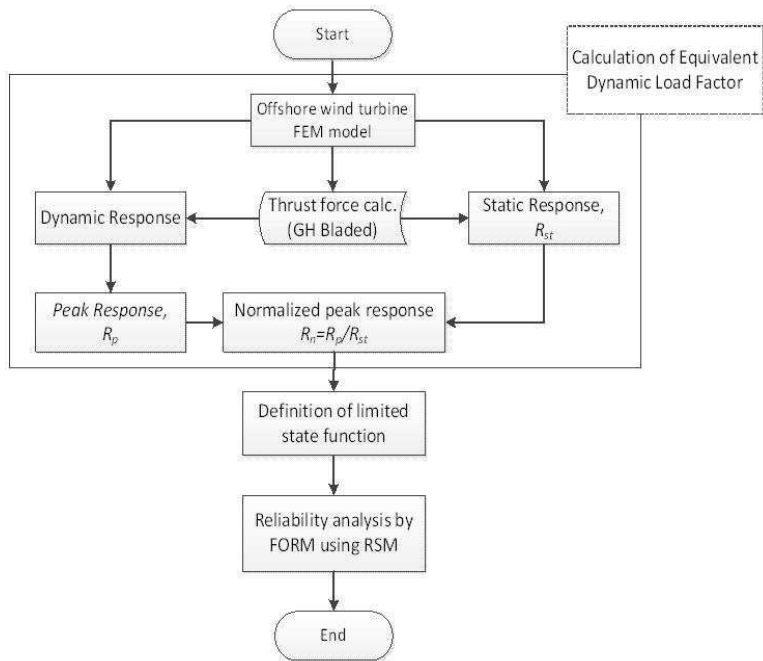
Contour plot for  $f_{R_p, X}(r_p, x)$

도면4



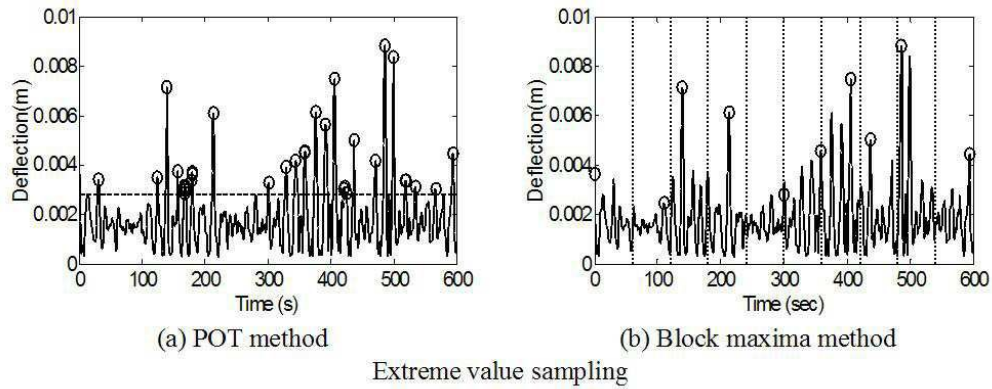
Contour plot for  $f_{R_n', X'}(r_n', x')$

도면5

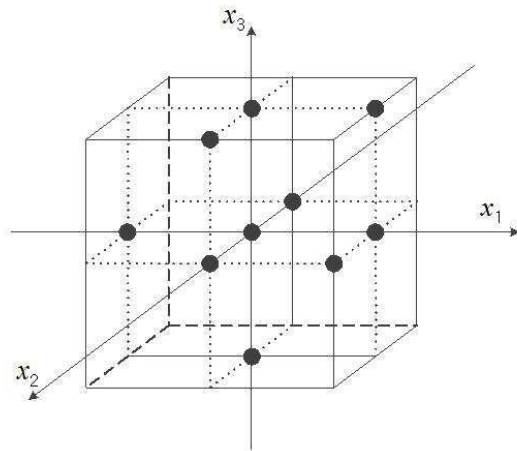


Flowchart for reliability analysis

도면6

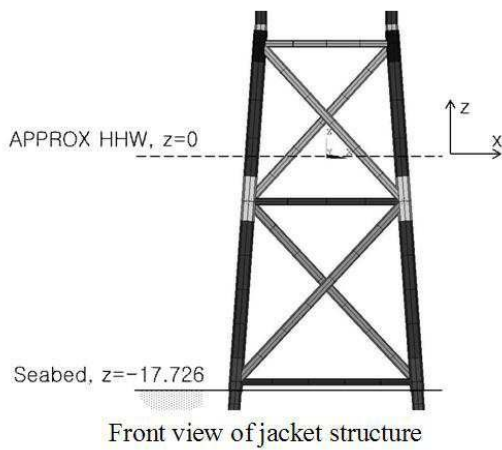


도면7

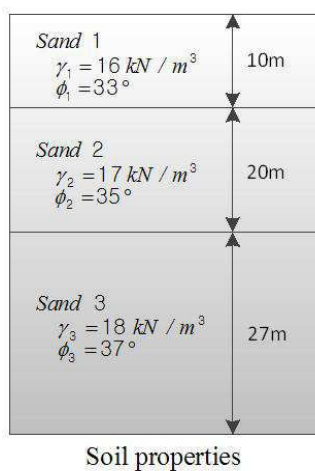


Saturated design using full second order polynomial with cross terms

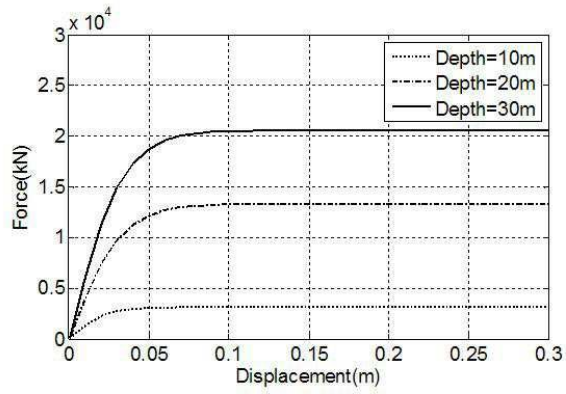
도면8



도면9

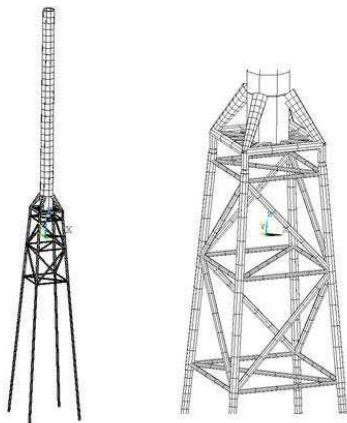


도면10



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

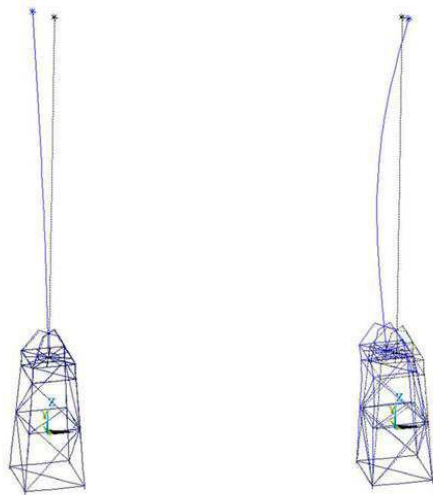
도면11



FEM model

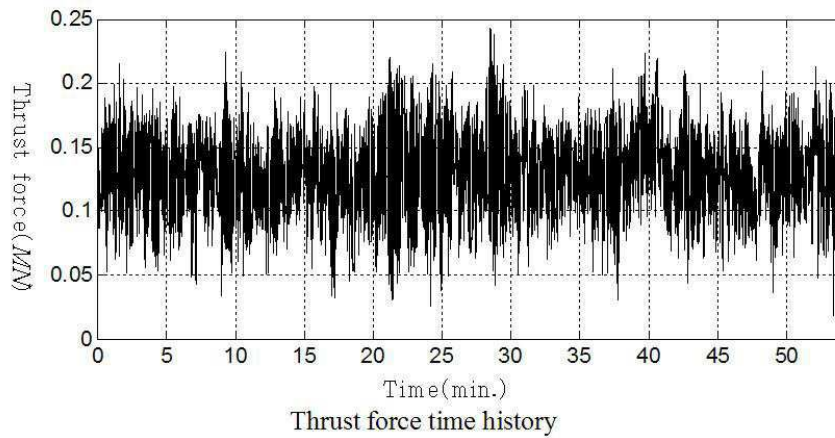


도면12



(a) 1<sup>st</sup> Mode(0.267 Hz)      (b) 2<sup>nd</sup> Mode(1.577 Hz)  
Mode shapes

도면13

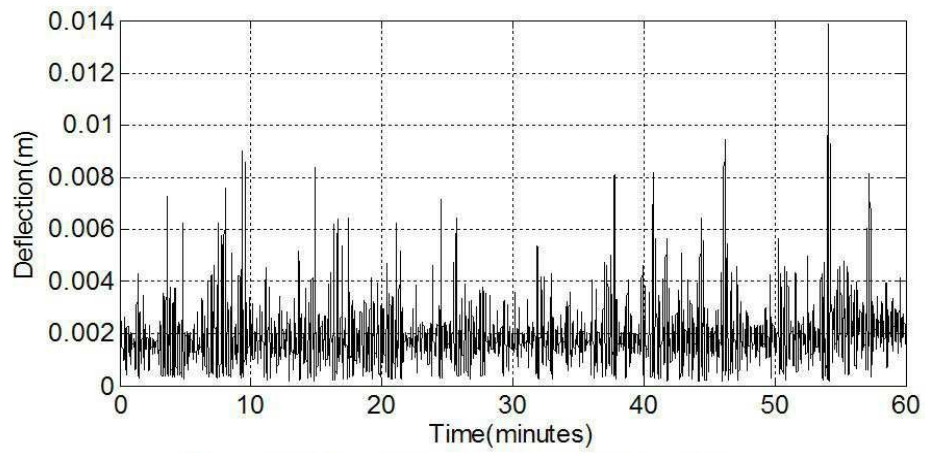


도면14

Design environmental condition

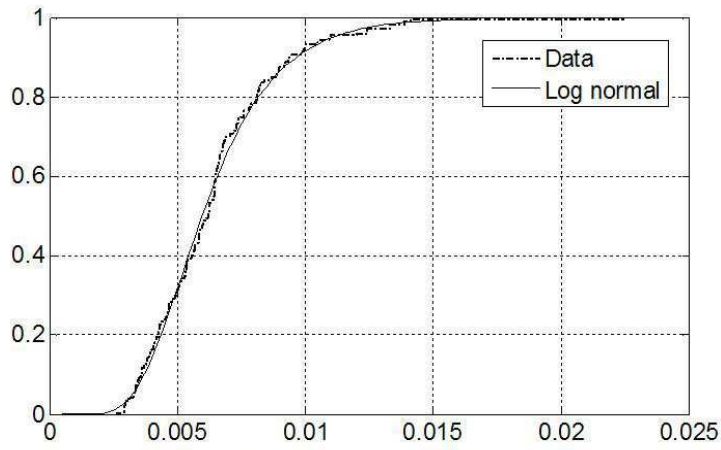
Operating condition	Parked(Idling)	
Significant wave height, $H_s$	7.4m	50 year return
Peak spectral period, $T_p$	15.19sec	JONSWAP spectrum
Mean wind speed	42.5m/sec	CLASS II, Iref:0.12
Water depth	17.726m	Approx H.H.W.

도면15



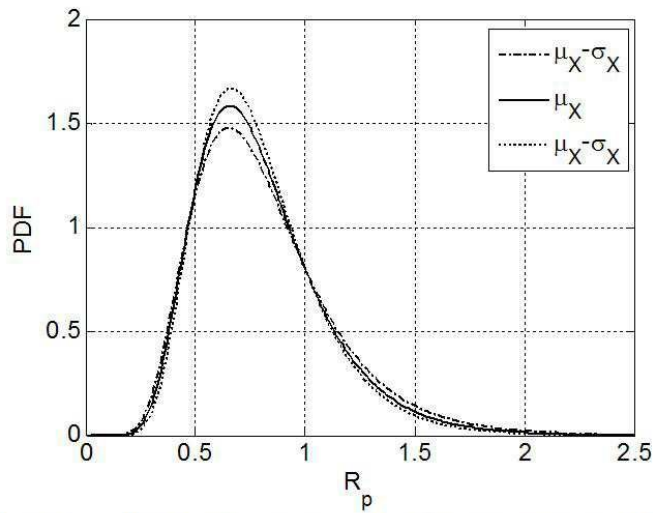
Dynamic response of support structure at mud-line

도면16



Lognormal distribution of peak response

도면17



PDFs of normalized peak response under different environmental load

도면18

Mean and standard deviation for the lognormal distributions

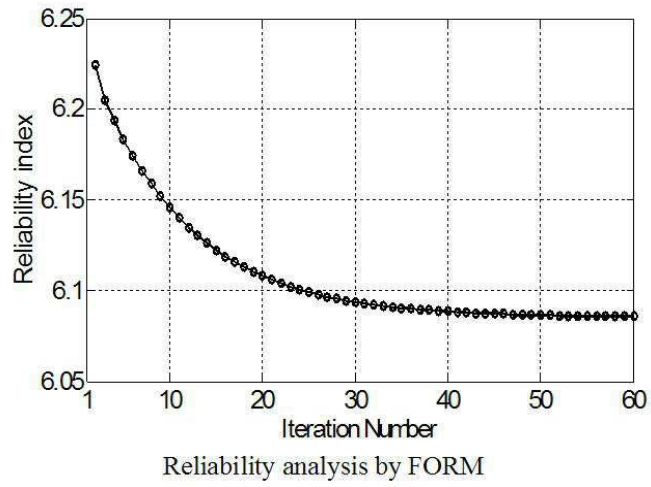
	$\lambda$	$\zeta$
$\mu - \sigma$	-0.2792	0.3843
$\mu$	-0.2929	0.3602
$\mu + \sigma$	-0.2965	0.3407

도면19

Distribution of random variables

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

도면20



도면21

Sensitivity factors and most probable failure points

Random variable	Sensitivity factor	MPFP
$R_n$	-0.9916	6.5609
$F_V$	-0.1204	0.1499 MN
$\gamma_1$	0.0065	15.9683 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_2$	3.8495e-7	17 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_3$	4.7536e-10	18 kN/m <sup>3</sup>
$\phi_1$	0.0467	31.9651 °
$\phi_2$	0.0009	34.9865 °
$\phi_3$	4.3865e-7	38.5 °
Reliability index, $\beta$	6.0857	