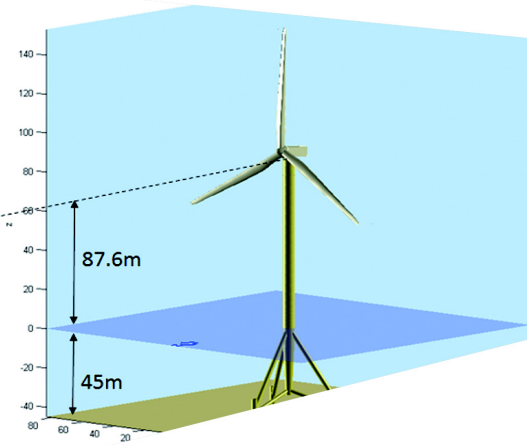


해상풍력 지지구조물의 신뢰성 설계

Reliability Design of Offshore Wind Turbine Support Structures



김 동 현

군산대학교 해양건설공학전공 교수



이 상 근

군산대학교 해양산업공학과 박사과정



김 영 진

군산대학교 해양산업공학과 박사과정



이 기 남

군산대학교 해양산업공학과 박사과정

1. 서 론

세계적으로 풍력발전 분야에 대한 관심이 집중되고 있으며, 설치 공간에 대한 제약, 소음 그리고 풍질 등의 문제를 해결하기 위한 방안으로 풍력발전기를 해상으로 확장하고 있다. 해상풍력발전기 지지구조의 형태는 크게 고정식과 부유식으로 나눌 수 있으며, 주로 시공 및 경험적인 지식이 풍부한 고정식 지지구조물이 주를 이룬다. 대표적인 고정식 지지구조물에는 재킷(Jacket), 모노파일(Mono pile) 그리고 트라이포드(Tripod)가 있다.

해상풍력발전기 지지구조의 운동은 파랑-구조물, 구조물-지반의 비선형 상호작용이 동시에 존재하기 때문에 동적해석을 수행함에 있어 막대한 계산시간이 소요된다. 더불어 반복적인 구조해석을 필요로 하는 신뢰성 해석에 동적응답을 활용하기에는 어려움이 따른다. 그로 인해 결국 정적응답에 근거한 신뢰성 해석만을 수행하게 되는데, 이 경우 동적하중이 작용함에 따른 구조물의 동적거동 특성을 한계상태식에 반영할 수 없으므로 정적응답에만 의존하는 해양구조물의 신뢰성 해석은 그 정확도가 낮다고 할 수 있다.

본 기사에서는 해상풍력발전기에 작용하는 하중의 종류, 지지구조물-지반의 상호작용을 위한 지반 경계조건에 대해 설명하고 동적응답으로 정의되는 한계상태식을 사용한 신뢰성 해석방법을 설명하고자 한다.

2. 해양환경의 불확실성

2.1 파랑하중

파랑에 수반된 물입자는 속도 및 가속도를 가지고 반복적인 운동을 한다. 부재에 작용하는 파랑하중은 물입자의 속도 및 가속도 성분을 이용하여 모리슨 방정식에 의해 계산되며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

따라서, 파랑하중을 계산하기 위해서는 파랑이론에 의해 계산되는 물입자의 속도와 가속도를 알아야 하며, 해양구조물 설계에 사용되는 해양파 이론은 파고, 주기, 수심조건에 따라 그림 2에 의해 선택할 수 있다.

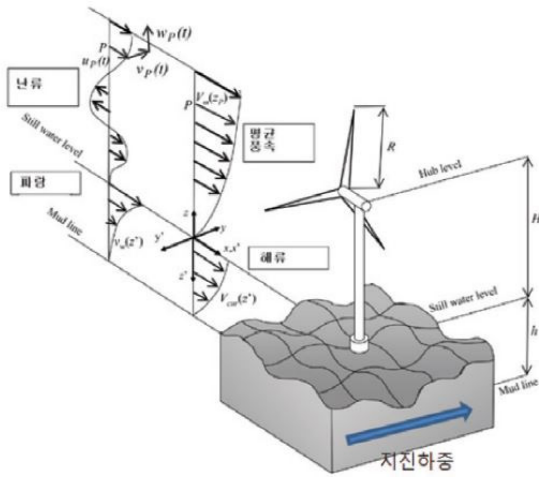
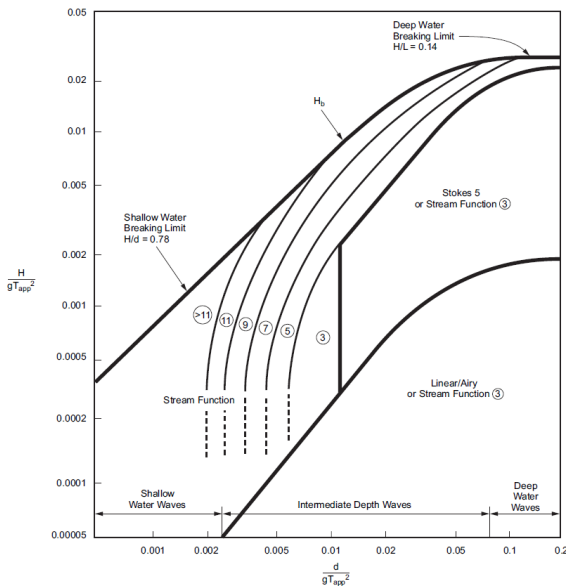


그림 1 해상풍력터빈에 작용하는 하중

실제 해양에서의 파랑은 단일한 파고와 주기를 갖는 규칙파가 아니라 불규칙하게 변동하고 있다. 이러한 파랑의 특징을 고려하여 구조해석을 수행하기 위해 사용되는 방법이 파랑 스펙트럼 방법이다. 파랑 스펙트럼은 파고와 주기가 다른 무한히 많은 규칙파의 집합으로 간주하고 이를 주파수와 파의 에너지로 나타낸 것으로 설계 유의파고 및 피크 주기에 따라 결정된다. 일반적으로 JONSWAP 또는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼이 사용되고 있다.



- d : Mean water depth, H : Wave height
- H_b : Breaking wave height
- T_{app} : Wave period
- g : Acceleration of gravity

그림 2 파랑이론의 적용

$$S_{JS}(f) = 0.3125 H_s^2 T_p \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-5} \exp\left(-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) (1 - 0.287 \ln \gamma) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{f}{f_p} - 1\right)\right)} \quad (2)$$

$$S_{PM}(f) = 0.3125 H_s^2 f_p^4 f^{-5} \exp\left(-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^4\right) \quad (3)$$

2.2 풍하중

2.2.1 풍속 등급(Wind turbine class)

풍력터빈은 설계수명동안 발생할 수 있는 극한 상태(Ultimate)의 피로조건(Fatigue)을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. GL2010에서는 이러한 설계조건으로 풍속과 난류강도를 등급에 따라 나누고 풍력터빈의 안전 요구사항을 규정하고 있으며, 구조적 안정성을 크게 극한하중(Ultimate Load)과 피로하중(Fatigue Load)으로 나누어 평가하도록 안내하고 있다. 이러한 GL2010의 Wind Turbine Class 분류는 풍속은 1, 2, 3 등급, 난류강도는 A와 B 등급으로 구분하였으며 각각의 등급에 따른 조건은 표 1과 같다.

2.2.2 Wind conditions

표 1에서 선택된 풍속등급과 함께 풍력터빈에 적용하는 풍하중의 분류는 크게 1년 재현주기의 정상풍속조건, 50년 재현주기의 극치풍속조건, 기타조건으로 구분되며 정상풍속조건에는 난류가 발생하는 경우가 포함되고, 극치풍속조건에는 난류 또는

표 1 Basic parameters for wind turbine classes

Wind Turbine Class	I	II	III	
V_{ref} [m/s]	50	42.5	37.5	
V_{ave} [m/s]	10	8.5	7.5	
A	I_{ref} [-]	0.18	0.18	0.18
	a [-]	2	2	2
B	I_{ref} [-]	0.16	0.16	0.16
	a [-]	3	3	3

V_{ref} : 10분간 최대평균풍속

A : designates the category for higher turbulence characteristics

B : designates the category for medium turbulence characteristics

I_{ref} : 풍속 15m/s에서의 난류강도 재현빈도

표 2 Wind conditions

Wind conditions	Wind states
Normal Wind Conditions	Normal Wind Profile model (NWP)
	Normal Turbulence Model (NTM)
	Extreme Wind speed Model (EWM)
	Extreme Operation Gust (EOG)
Extreme Wind Conditions	Extreme Turbulence Model (ETM)
	Extreme Direction Change (EDC)
	Extreme Coherent gust with DC (ECD)
	Extreme Wind Shear (EWS)
Other	Reduced Wind Model (RWM)

돌풍이 발생하는 경우와 풍향 또는 풍속이 바뀌는 경우 등의 다양한 풍황조건(Wind conditions)이 존재한다.

IEC 61400-1 & 3에서는 이러한 풍황조건 별로 풍력터빈 해석 시 허브 높이에서 일정 범위의 풍속을 제시함으로써 여러 기준 풍속(V_{hub})의 해석을 수행토록 규정하고 있다. 이러한 풍황조건에 대한 분류를 표 2에 나타내었다.

2.3 지진하중

해상에는 상기 내용의 상시 작용하는 파랑 및 풍하중뿐만 아니라 불확실성이 매우 큰 지진, 태풍, 해일 등의 하중이 발생한다. 이러한 하중들은 발생 위치, 크기, 전파 경로 등 구조물에 가해지는 영향에 대한 정확한 정보를 얻기에는 많은 어려움이 따른다. 지진의 경우 한반도 내의 발생 횟수는 점차 증가하고 있으며, 비교적 해상에서 큰 규모의 지진이 발생하고 있으므로 해양 구조물의 지진에 대한 안전성 평가는 매우 중요하다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 지진의 발생 시기와 크기 등에 대한 불확실성이 매우 크기 때문에 구조물의 내진설계시 이를 고려하여야 한다.

불규칙적으로 발생하는 지진의 예측에는 어려움이 따른다. 때문에 항만 및 어항 설계기준(MOF, 2005)에서는 한반도에 대한 각 재현주기 별 설계진도를 제시하였으며, 그림 3과 같이 재현주기(T)에 대한 지진재해도를 통해 여러 재현주기에 대한 지진계수의 관계를 이용하여 지진계수에 대한 확률분포와 모수를 구할 수 있다.

또한, 가속도 표준설계응답스펙트럼 상의 지진계수 C_a 와 C_v 를 지반의 종류에 따라 표 3~4의 값을 사용하도록 제시하였다. 지진재해도상의 값(S_B 값)을 해당기초지반의 값으로 변환하여 사용하며, 이때 S_B 를 기준으로 한 여타 지반의 증폭비율을 고려하여 변환한다.

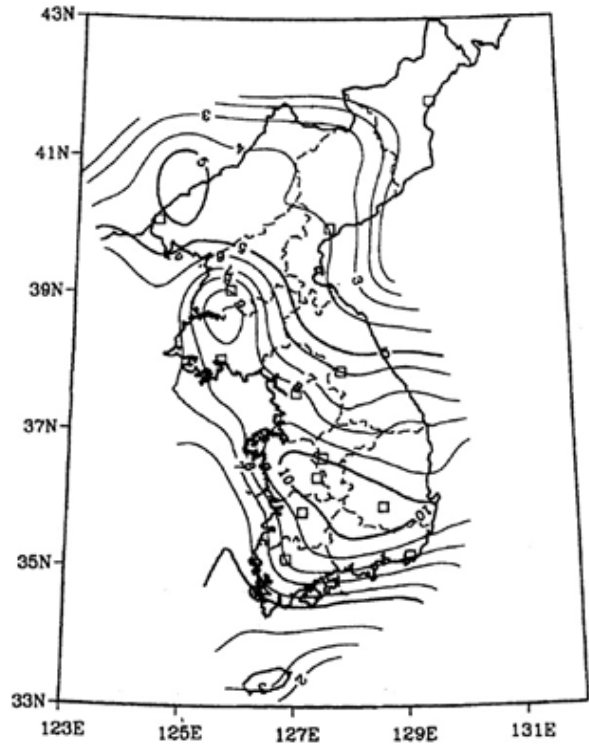


그림 3 지진재해도 ($T=500$ year)

표 3~4에 제안된 지반의 종류는 표 5와 같은 특성을 통해 분류된다.

가속도 시간이력을 사용하여 동적해석을 수행할 경우 실지진 기록을 수정한 지진기록을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나

표 3 지진계수 C_a (재현주기 500년에 해당)

지반 종류	지진 구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.13	0.08
S_D	0.16	0.11
S_E	0.22	0.17

표 4 지진계수 C_v (재현주기 500년에 해당)

지반 종류	지진 구역	
	I	II
S_A	0.09	0.05
S_B	0.11	0.07
S_C	0.18	0.11
S_D	0.23	0.16
S_E	0.37	0.23

표 5 지반의 분류

지반 종류	상부 30 m에 대한 평균지반특성		
	전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N}(N_{CH})$ (blow/foot)	비배수전단강도 \bar{S}_u KPa{kgf/cm ² }
S_A	경암	1500 초과	-
S_B	보통암	760에서 1500	-
S_C	매우 조밀한 토사 또는 연암	360에서 760	> 100 {> 1.0}
S_D	단단한 토사	180에서 360	50에서 100 {0.5 ~ 1.0}
S_E	연약한 토사	180 미만	< 50 {< 0.5}
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반		

해당 지역의 계기지진이 존재하지 않는 경우 인공지진을 생성하여 사용하며, 이는 앞서 언급한 표준설계응답스펙트럼에 준하여 생성하도록 한다.

3. 지반 설계변수의 불확실성 소개

3.1 지반정수의 변동성

기초설계를 위하여 보통 지반을 구성하는 흙은 균질한 층으로 가정하는 것이 일반적이며, 결정론적 개념으로 판단하면 지층의 심도와 성질은 편차가 없는 단일 값으로 대표된다. 이러한 가정은 지반이 수평 및 연직방향에서 공간적 변동성없이 국부적으로 균질함을 의미한다. 그러나 지층은 흙의 퇴적이력(Stress history)에 따라 성질이 크게 변화하고 지반의 특성도 심도와 공간적 위치에 따라 다르므로 확률변수(Random Variable)로 취급함이 타당하다. 일반적으로 지반에 대한 변동성은 지반정수에 대해 표준편차와 평균값의 비인 변동계수(COV)로 표현되며, 이는 그 생성위치, 퇴적환경, 기후 등에 따라 매우 다양하여 단일화된 수치로 정의하기는 어렵다. 현재까지 연구된 지반정수의 물리적 특성과 역학적 특성 및 압밀특성에 대한 변동계수를 표 6과 표 7에 제시하였다.

표 6 Range of the COVs of Physical Soil Property

Soil property	COV(%)
Unit weight	3~10
Liquid limit(clay,silt)	3~30
Plastic limit(clay,silt)	3~30
Water content(clay,silt)	8~30
Relative density	10~40
Specific gravity	2
Saturation	10

표 7 Range of the COVs of Mechanical Soil Property

Soil property	COV(%)	
Shear strength	Drained(clay, silt)	3~12
	Undrained(clay, clay silt)	10~63
angle of shear resistance	Sand	2~14
	Gravel	7
	Clay	10~56
	Silt	4~23
Cone resistance	5~60	
N-value(SPT)	15~50	
Dilatometer tip resistance	5~15	

조사 자료가 부족한 경우 이와 같은 자료를 참조할 수 있다 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion, 2011).

3.2 지반 모델

말뚝의 변위가 커지면서 지반반력이 항복점에 도달한 후 탄성 영역에서 소성영역으로 넘어가므로 말뚝변위와 지반반력 사이에는 비선형적인 함수관계가 존재한다. 이러한 말뚝변위-지반반력의 함수관계는 P-y 곡선이라 표현하며, P-y 곡선법의 개념은 1956년 McClelland - Focht가 수평재하시험결과와 실내시험결과로부터 수평하중을 받는 말뚝의 지반반력과 삼축시험에 의한 점토의 압밀비배수 응력-변형률 관계를 비교 검토하여 도입하였다. Reese와 Matlock, Reese와 Cox는 연구를 확장하여 비선형 지반 반력-변위 관계 P-y 곡선을 말뚝의 수평지지력 계산에 적용하는 방법을 제안하였으며, 미국 석유협회(API)의 해양구조물에 관한 지침서 API RP2A에 채택되어 널리 사용되고 있다.

3.2.1 P-y curves for sand

기존 API RP2A(1987) 지침서의 p-y 곡선을 urchison과 O'Neill

(1983)이 수정하여 제안하였다. 수정된 P-y 곡선은 그림 4, 식 (4)와 같이 쌍곡선 탄젠트 함수로 나타낼 수 있다.

$$P = Ap_u \tanh \left[\frac{kH}{Ap_u} y \right] \quad (4)$$

p_u : ultimate bearing capacity at depth H

y : lateral deflection

H : depth

A : factor to account for cyclic or static loading condition

$A=0.9$ for cyclic loading

$A = \left(3.0 - 0.8 \frac{H}{D} \right) \geq 0.9$ for static loading

k : initial modulus of subgrade reaction

앞서 언급된 말뚝의 극한지지력 p_u 는 식 (5)와 같이 계산할 수 있으며, 둘 중 작은 값으로 한다.

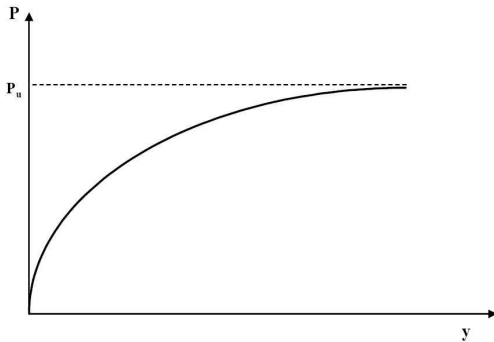


그림 4 Murchison & O'Neill의 p-y 곡선

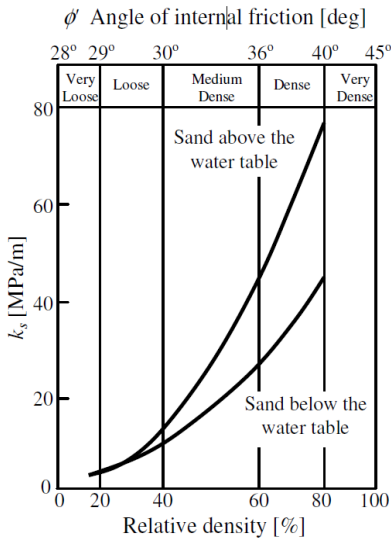


그림 5 Initial modulus of subgrade reaction

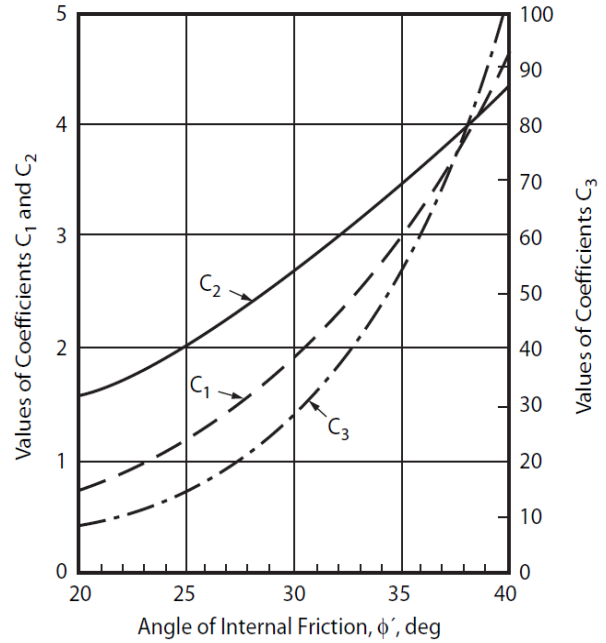


그림 6 Coefficients as function of ϕ'

$$p_u = \min \left\{ \begin{array}{l} p_{us} = (C_1 H + C_2 D) p_o' \\ p_{ud} = C_3 D p_o' \end{array} \right\} \quad (5)$$

$C_1 \sim C_3$: dimensionless coefficients

H : depth

D : average pile diameter from surface to depth

$p_o' = \gamma H$: effective overburden pressure

3.2.2 P-y curves for soft clay

Matlock(1970)은 연약한 점토층에서 수행된 말뚝의 수평재하시험 결과와 이론적인 고찰을 통해 임의의 깊이에 대한 P-y 곡선을 제안하였다. 제안된 P-y 곡선은 정적하중과 반복하중으로 구분할 수 있으며, 표 8~9에 나타내었다.

$$p_u = 3c + p_o' + J \frac{cX}{D} \quad (6)$$

$$p_u = 9c \quad \text{for } X \geq X_R$$

c : undrained shear strength

J : dimensionless empirical constant

X : depth

X_R : depth below soil surface to bottom of reduced resistance zone

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{c} + J}$$

표 8 Static loading

p/p_u	y/y_c
0.00	0.0
0.23	0.1
0.33	0.3
0.50	1.0
0.72	3.0
1.00	8.0
1.00	∞

표 9 Cyclic loading

$X > X_R$		$X < X_R$	
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	∞

- y : actual lateral deflection
- p : actual lateral resistance
- strain which occurs at one-half the maximum stress
- ϵ_c : on laboratory unconsolidated undrained compression tests of undisturbed soil samples
- $y_c = 2.5\epsilon_c D$

4. 지지구조물의 응답특성

구조물에 영향을 주는 환경 하중들은 시간에 따라 변화하는 동적하중으로 조화하중과 같은 단순한 파형이 아닌 불규칙한 파형을 갖는다. 그림 7은 불규칙 파형의 예로 지진하중의 시간 이력을 도시한 그림이다.

이러한 파형은 주기 또는 진폭이 다른 다양한 파형으로 분리할 수 있고, 해당 하중을 대표하는 파형을 선별할 수 있다. 선별된 대표 파형의 주파수를 가진주파수(ω_c)라고 하며, 동적 효과에 큰 영향을 미친다. 또한 구조물은 고유한 진동특성을 갖고 있고, 이를 고유주파수(또는 고유진동수, ω_n)라 한다. 구조물의 고유주파수와 하중의 가진주파수의 비를 진동수비라고 하고, 이는 공진의 판단 및 동적 효과의 예측에 사용된다. 동적응답(R_d)이 정적응답(R_{st})에 비해 확대되는 현상인 동적 증폭효과와 진동수비(β), 그리고 감쇠비(ζ)는 서로 연관되어 있으며, 여기서 동적응답과 정적응답의 비를 동적증폭계수(dynamic amplifica-

tion factor)라고 한다. 그림 8은 진동수비와 감쇠비에 따른 동적 증폭계수를 보여주며, 비감쇠의 경우 진동수비가 1일 때 공진 현상이 발생하여 동적증폭계수는 무한대로 최대가 된다.

같은 하중이 작용하더라도 구조물의 진동 특성에 따라 응답이 다르게 나타날 수 있으며, 정적응답만으로는 위의 진동 특성, 즉 동적 효과를 표현할 수 없으므로 동특성이 반영된 응답을 설계에 적용하는 것이 중요하다.

5. 신뢰성 해석의 적용 예

신뢰성 해석 예제를 통해 앞서 설명된 설계변수들의 적용 방법을 소개하고자 한다. 대상 지지구조물의 형태는 Tripod형식

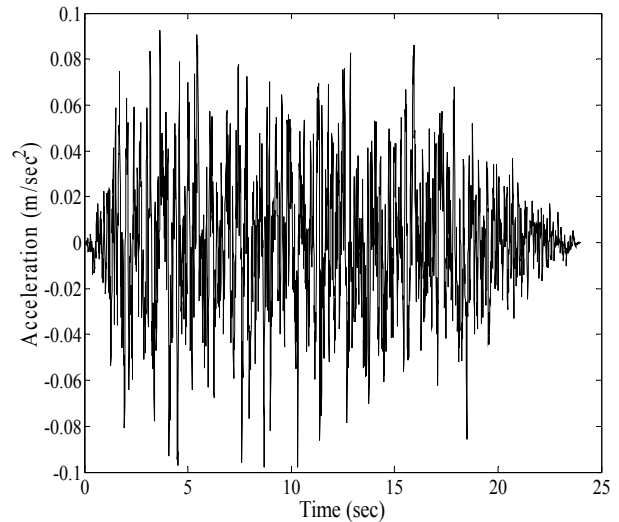


그림 7 지진가속도 시간이력($p_{ga} = 0.01g$)

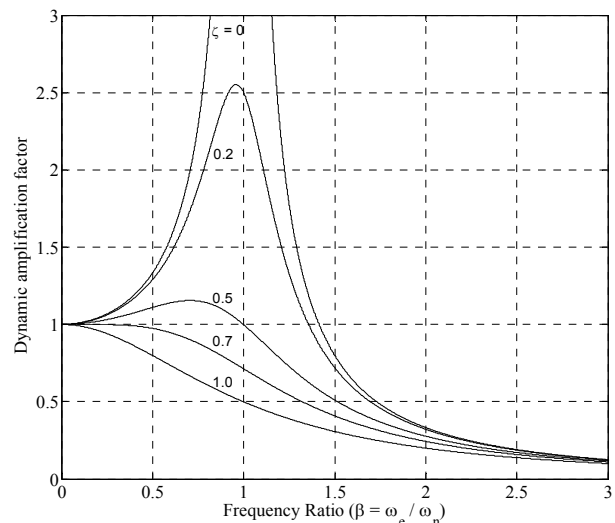


그림 8 동적증폭계수

이며, 신뢰성 해석은 Level II 방법인 일계신뢰도법(First Order Reliability Method, FORM)을 사용하였다.

5.1 대상 구조물 및 지반 경계조건

해상풍력발전기 하부 지지구조의 형태는 Tripod로 International Energy Agency(IEA) Wind Annex 23에서 수행된 Offshore Code Comparison Collaboration(OC3) 프로젝트의 모델을 대상으로 하였으며, 타워 및 상부 터빈의 제원은 3-블레이드 Upwind 타입으로 NREL 5-MW 모델을 참조하였다.

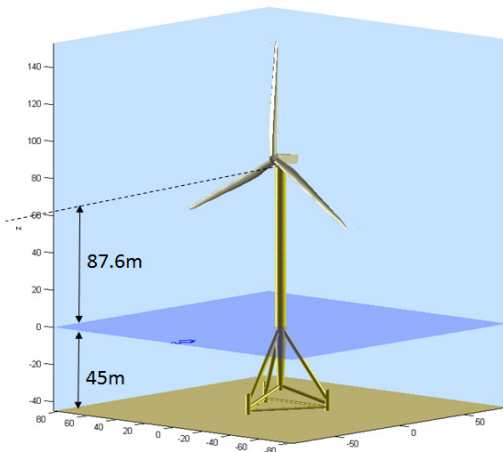


그림 9 Tripod 지지구조 해상풍력 발전기

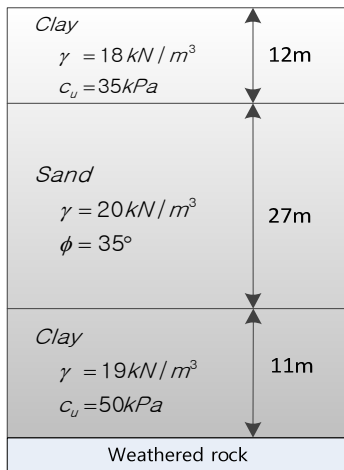


그림 10 적용 예제의 지반 조건

5.2 유한요소모델

수치해석을 위해 지지구조 및 비선형 지반 스프링 모델링은 범용 유한요소해석 프로그램인 Ansys ver. 12를 사용하였다(Ansys, 2009). 보(Beam)요소를 사용하여 모델링하고 Joint에 대해서는 판(Shell)요소를 사용해 상세 모델링을 수행하였다. 상부 구조물인 허브(Hub)와 너셀(Nacelle)은 무게중심을 고려하여 질량 요소를 사용하여 모델링하였으며, 각 요소간 연결은 질량이 없는 강체(Rigid)요소를 사용하여 정의하였다. 지반은 말뚝과 지반의 비선형 상호작용을 고려하기 위해 비선형 스프링 요소로

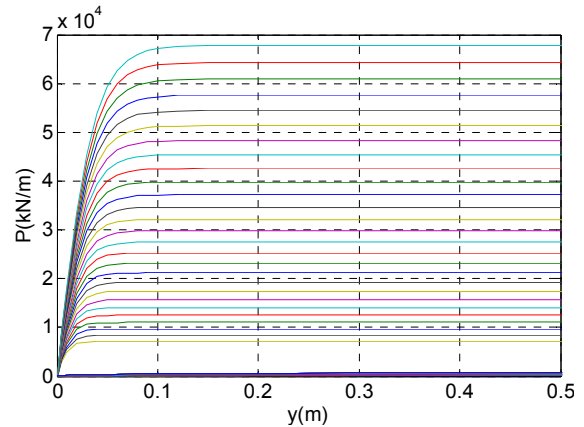


그림 11 지반 조건에 대한 P-y curves

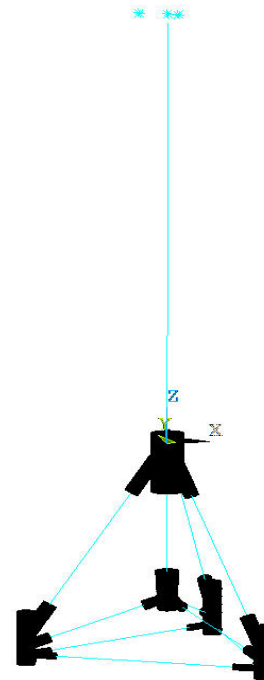


그림 12 유한요소모델

모델링하였으며, 비선형 스프링의 물성은 계산된 P-y 곡선을 사용하여 정의되었다.

5.3 설계 하중조건

설계 하중조건은 DNV 기준에 의해 결정하였으며(DNV, 2013), 해당 기준에서 제시하는 설계 하중조건은 해상풍력터빈의 작동 상태 및 풍하중, 파랑하중 등에 따라 크게 3~4가지의 설계하중 조건을 제시하고 있다. 본 예제에서는 해상풍력터빈의 작동시 극한하중이 작용하는 조건을 대상으로 하였으며 하중조건을 정리하면 표 10과 같다.

5.4 설계변수의 확률특성 및 한계상태함수 정의

동적 파랑하중의 확률적 변동성은 Kim과 Lee(2015)의 연구에서 제안된 피크응답계수(Peak response factor)를 사용하여 정의되었다. 피크응답계수는 파랑하중의 동적응답을 정적응답으로 정규화한 확률변수로, 구조 해석시 모리슨 방정식에 의해 계산된 각 절점 하중에 곱함으로써 파랑하중을 계산하게 된다. 터빈

표 10 설계 하중조건

Design situation	Power production
Wind condition	Normal Turbulence Model(NTM) $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$
Wave condition	Severe Sea State(SSS) $H_s = H_{s,sss}$
Wind and wave directionality	Codirectional in one direction
Current	Wind-generate current
Water level	1-year water level
Limit state	Ultimate limit state(ULS)

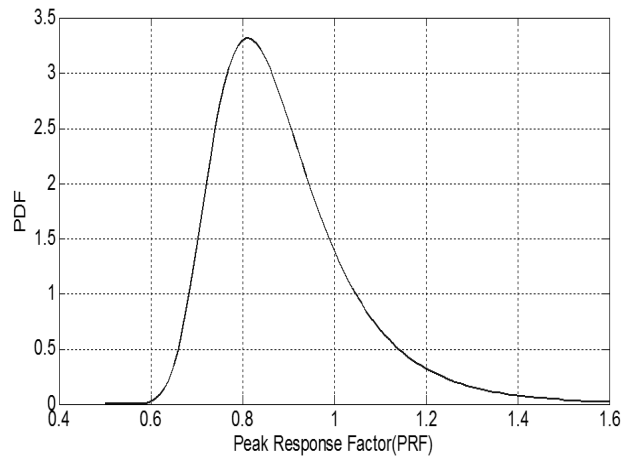


그림 13 피크응답계수의 확률밀도함수

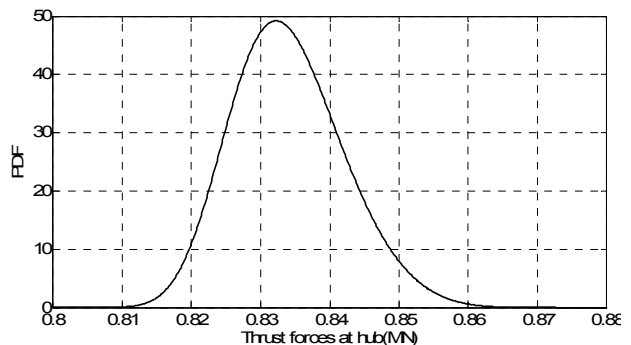


그림 14 추력의 확률밀도함수

에 작용하는 추력은 GH_blated를 사용하여 3차원 난류 바람장 생성 및 해석을 수행하여 계산되었다.

DNV 기준에서 지반정수의 범위는 음수가 아닌 특정 범위를 갖고 있기 때문에 일반적으로 대수정규분포 및 Beta분포의 사용을 제안하고 있으므로, 내부마찰각에 대해서는 Beta분포를 적용하였으며, 단위중량 및 비배수 전단강도에 대해서는 대수정규

표 11 확률변수

Symbol	Description	Unit	Mean	Cov	Dist.
X_1	Peak response factor	-		shape : -0.0335 scale : 0.1066 location : 0.8381	Weibull
X_2	Thrust force	MN		shape : -0.1813 scale : 0.0076 location : 0.8307	Weibull
X_3	Unit weight of soil(L1)	kN/m ³	18	0.05	LN
X_4	Unit weight of soil(L2)	kN/m ³	20	0.05	LN
X_5	Unit weight of soil(L3)	kN/m ³	19	0.05	LN
X_6	Internal friction angle(L2)	deg	35	0.05	Beta
X_7	Undrained shear strength(L1)	kPa	35	0.26	LN
X_8	Undrained shear strength(L3)	kPa	50	0.26	LN
X_9	Yield stress	MPa	355*1.05	0.07	LN

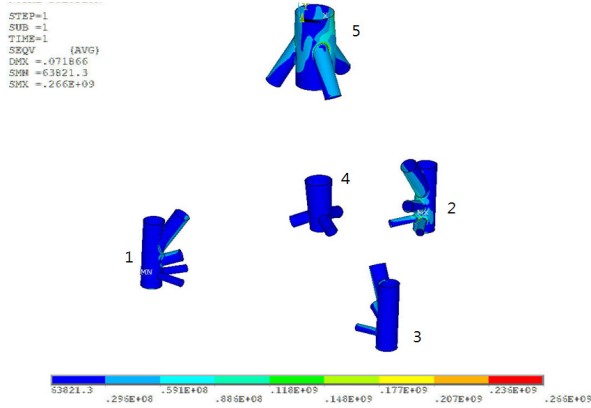


그림 15 구조해석 예제

분포로 가정하였다(DNV, 2012).

한계상태는 식 (7)과 같이 Joint에서 발생하는 응력이 허용 응력(X_9)을 초과하는 상태를 한계상태함수로 정의하였다.

$$g = X_9 - S(F_{st}, X_1, X_2 \sim X_8) \quad (7)$$

여기서, F_{st} 는 각 절점에 작용하는 정적 파랑하중이다.

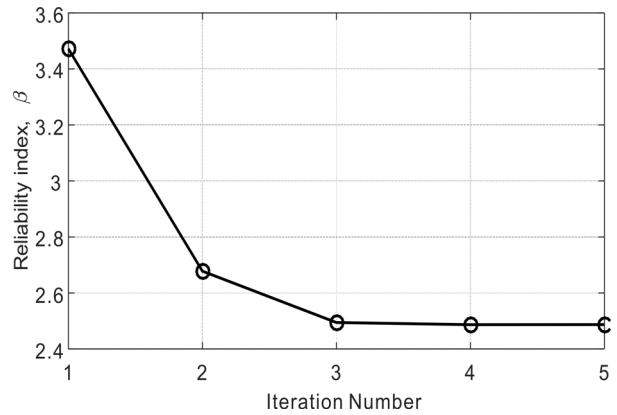
일계신뢰도법을 사용한 신뢰성 해석시 한계상태함수는 양함수로 표현되어야 한다. 설계변수에 의한 구조물의 응답 $S(\)$ 는 음함수로 정의되어 있으므로, 응답면 기법을 사용하여 구조물의 응답을 양함수로 근사할 수 있다.

5.5 신뢰성 해석 및 결과

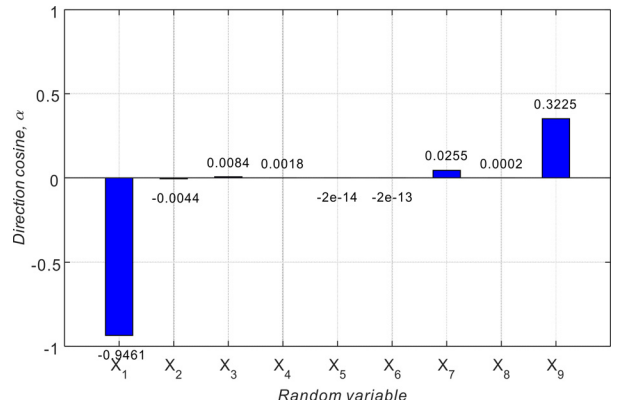
신뢰성 해석결과 신뢰도지수는 그림 16(a)와 같이 약 3번의 반복과정 이후 2.46으로 수렴되었으며, 이를 파괴 확률로 환산하면 약 0.68%에 해당한다. 민감도계수는 각 설계변수가 파괴에 미치는 영향 정도를 나타내는 척도로 각 설계변수별 민감도 지수를 살펴보면 피크응답계수(X_1), 허용응력(X_9)이 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 하중 측면에서는 파랑하중, 저항 측면에서는 허용응력이 구조물의 파괴를 유발하는 가장 큰 요소인 것으로 해석할 수 있다. 반면 지반물성과 관련된 설계변수의 민감도계수는 매우 낮게 나타나 지반 강성의 변화에 따른 Joint의 응력변화가 크지 않음을 알 수 있다.

6. 맺음말

육상과 달리 해상에는 풍력터빈 지지구조물 설계시 고려해야 할 불확실성을 가진 설계변수가 다양하게 존재한다. 여기에는



(a) 신뢰도 지수




(b) 민감도 계수

그림 16 신뢰성 해석결과

풍하중, 파랑하중, 지진하중, 해저지반 등 불확실성의 정도가 큰 변수가 존재하고 이러한 설계변수들이 지지구조물의 파괴 확률을 지배하게 된다. 특히, 공용기간 동안 작용하는 빈도가 높은 풍하중과 파랑하중은 동적하중으로서 이에 의한 구조물의 응답은 정적응답과 달리 구조물의 동특성에 민감하다. 따라서 신뢰성 해석 또한 구조물의 동특성을 반영해야 한계상태에 의한 파괴확률을 정밀하게 산정할 수 있다. 결론적으로 신뢰성 설계 기법을 이용한 해상풍력터빈 지지구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 외력 및 환경조건의 불확실성에 대한 적절한 평가와 구조물의 동적특성을 반영한 합리적인 방법을 적용하여야 한다.

7. 참고문헌

1. 김기두, 최동호, 심종성, 김경철. (2011) 해상풍력 지지구조물의 개발 및 설계, 대한토목학회지, 제 59권, 제 5호, 28-37.
2. 윤길림, 김선빈, 권오순, 유무성. (2014) 서남해안 해상풍력

- 34권, 제 5호, 1489-1504.
3. 이상근, 김동현. (2014) 극한 해양 환경하중을 고려한 해상 풍력터빈 지지구조물의 신뢰성 해석, 한국해양·해양공학회 논문집, 제 26권, 제 1호, 33-40.
 4. 홍정우, 함태규. (2007) 해상풍력발전 터빈의 동적 해석기술 개발, 포스코엔지니어링 기술보, 제 28권, 제 1호, 136-153.
 5. Ansys, Inc. (2009) Ansys User's Manual, Ver. 12.0, Canonsburg, PA, USA.
 6. American Petroleum Institute (API). (2007) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. API Publishing Services.
 7. American Petroleum Institute (API). (2000) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, 21st edition, API Publishing Services.
 8. Det Norske Veritas (DNV). (2013) DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures. Det Norske Veritas: Høvik, Norway.
 9. Det Norske Veritas(DNV). (2012) DNV-RP-C207: Statistical Representation of Soil Data. Det Norske Veritas: Høvik, Norway.
 10. Garrad Hassan(GH). (2013) Bladed user manual. Garrad Hassan and Partners Limited Document.
 11. GL2010, (2010) Guideline for the Certification of Wind Turbines, Germanischer Lloyd.
 12. IEC(International Electro-technical Commission), (2005) IEC 61400-1 (Ed.3.0), Wind turbines - Part 1: Design requirements, IEC Central Office, Geneva.
 13. IEC(International Electro-technical Commission), (2009) IEC 61400-3 (Ed.3.0), Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, IEC Central Office, Geneva.
 14. Kim, D.H. and Lee, S.G., (2015) Reliability Analysis of Offshore Wind Turbine Support Structure under Extreme Ocean Environmental Loads, Renewable Energy, Vol 79, pp.161-166.
 15. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST), (2001) Final report for development of reliability based design method for port & harbor structures.
 16. Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). (2005) Engineering Standards Commentaries Port and Harbor Facilities, Ministry of Oceans and Fisheries, Korea. 

[섭외: 이진학 편집위원]