

Pushover 해석을 이용한 5MW급 해상풍력터빈의 지진취약도

이상근* · 김동현** · 윤길림***

*군산대학교 대학원 해양산업공학과

**군산대학교 해양건설공학과

*** 한국해양과학기술원 연안개발에너지부

Seismic Fragility for 5MW Offshore Wind Turbine using Pushover Analysis

Sang-Geun Lee*, Dong-Hyawn Kim** and Gil-Lim Yoon***

*Department of Ocean Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

**Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

***Coastal Engineering and Ocean Energy Research Department, KORDI, Ansan, Korea

KEY WORDS: Offshore wind turbine 해상풍력터빈, Seismic response 지진응답, Fragility curve 취약도 곡선, Pushover analysis Pushover해석, Soil structure interaction 지반 구조물 상호작용

ABSTRACT: Seismic fragility curves for an offshore wind-turbine structure were obtained. The dynamic response of an offshore wind turbine was analyzed by considering the nonlinear behavior of layered soil and the added mass effect due to seawater. A pile-soil interaction effect was considered by using nonlinear p - y , t - z curves. In the analysis, the amplification effect of ground acceleration through layered soil was considered by applying ground motion to each of the soil layers. The vertical variation in ground motion was found by one-dimensional free-field analysis of ground soils. Fragility curves were determined by damage levels in terms of tower stress and nacelle displacements that were found from static pushover analysis of the wind-turbine structure.

1. 서 론

세계적으로 신재생에너지의 중요성이 대두되고 있으며 관련 분야에 대한 연구 및 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 그 중 바람을 이용하여 에너지를 생산하는 풍력발전 분야에 대한 관심이 급증하고 있으며, 육상을 벗어나 해상에 구조물을 건설하는 사례가 증가하고 있다. 해상에서는 육상에 비해 비교적 낮은 고도에서 양질의 풍력 에너지를 얻을 수 있고, 해상공간의 효율적인 활용 측면에서 해상풍력터빈의 건설이 증가하는 추세이다. 그리고 발전용량 증대를 위해 터빈 및 블레이드의 크기가 커짐에 따라 지지구조물의 크기 또한 대형화 되고 있다. 이러한 해상풍력터빈은 건설비용이 많이 소요되고, 에너지원으로서 매우 중요한 시설물이기 때문에 경제적인 효율성과 안전성을 동시에 확보할 수 있어야 한다. 최근 한반도에서 발생하는 지진의 발생 횟수가 매년 증가하고 일본 중국 등 인접국가에서 지진으로 인한 막대한 피해가 보고되고 있는 상황으로 주요 시설 및 구조물에 대해 지진의 크기에 따라 어느 정도의 손상을 입을지 평가 및 예측이 필요하다.

모노파일기초 해상풍력터빈은 지반에 관입된 말뚝기초 구조물로 지반 강성 및 동적거동에 의해 구조물의 안정성이 결정된다고

볼 수 있다. 기존 항만 구조물의 지진취약도 관련 연구에는 1차원 지반응답 해석을 통해 증폭된 지진가속도를 사용하여 확률론적 지진재해도를 평가한 연구가 있다(Kim and Kim, 2005). 그러나 기초 말뚝이 다층지반에 깊게 관입되어 있는 해상풍력터빈의 경우 지진 발생시 심도별 다른 진폭과 위상을 갖는 지진가속도가 구조물 기초에 작용하게 된다. 이러한 현상을 모사하기 위해서는 지반을 솔리드요소 및 무한요소 등으로 고려하는 방법이 있으나 동적지진응답 해석을 통한 지진취약도 해석의 경우 반복적인 해석을 필요로 하기 때문에 솔리드요소를 사용하는 방법은 요소 및 절점의 개수 증가로 해석에 걸리는 시간이 과도하게 많이 소요된다는 제한사항이 있다. 그리고 지반을 스프링으로 치환하는 방법을 통해 기초를 모델링하고 구조물에 지진가속도를 가할 경우 이 역시 지반 증폭현상을 고려하지 못하기 때문에 구조물의 보다 정확한 동적응답을 파악하지 못할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 가장 일반적인 기초형식인 모노파일 기초의 5MW급 해상풍력 터빈을 선정하여 지반 증폭현상을 고려한 지진 취약도 해석을 수행하였다. 지반에 관입된 기초파일의 비선형 수평거동을 고려하기 위해 지반을 비선형 스프링으로 모델링 하였으며, 하중으로 작용하는 지진 하중의 경우 과거 일본에서 발생했던 실제 지진 기록인 Hachinohe,

Received 26 December 2012, revised 30 July 2013, accepted 22 August 2013

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

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

Ofunato의 지진이력과 항만 및 어항설계기준의 내진설계 기준에 따라 표준 설계응답스펙트럼에 맞는 인공지진을 생성하여 사용하였다. 지진시 지반증폭 현상을 고려하기 위해 1차원 지반응답 해석 후 심도별 시간이력 하중으로 입력하여 지진응답 해석을 수행하였다. 지반응답 해석은 Proshake V1.1을 사용하였으며, 유한요소 모델링 및 해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 12.0을 사용하였다.

2. 지진 취약도

지진하중이 구조물에 작용하였을 때 구조물에 일정 손상이 발생할 확률을 나타내는 것이 지진취약도 함수이다. 지진취약도 해석 방법은 국내·외에서 널리 사용되고 있는 Shinozuka의 지진취약도 분석 방법을 사용하였으며, 취약도 곡선은 다음과 같이 대수정규분포 함수로 나타낼 수 있다.(Shinozuka et al., 2000)

$$F_k(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{c_k} \right)}{\zeta_k} \right] \quad (1)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포 함수의 누적확률 분포함수이며, a 는 지진의 최대지반가속도, c_k 는 중앙값(Median), ζ 는 대수표준편차(Log-standard deviation)이다. 총 n 회 발생한 지진에서 i 번째에 손상을 입을 경우 손상에 대한 확률($F_k(a_i)$)을 누적시키고, 손상을 입지 않을 경우 손상이 발생하지 않을 확률($1 - F_k(a_i)$)을 누적되도록 우도함수(Likelihood function)를 식 (2)과 같이 정의한다.

$$L = \prod_{i=1}^n [F_k(a_i)]^{x_i} [1 - F_k(a_i)]^{1-x_i} \quad (2)$$

대수정규분포 함수의 중앙값과 대수표준편차는 식 (3)과 같이 우도함수에 로그를 취하여 $\ln L$ 을 최대화 하는 최적화문제를 풀어 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial c_k} = \frac{\partial \ln L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n_k) \quad (3)$$

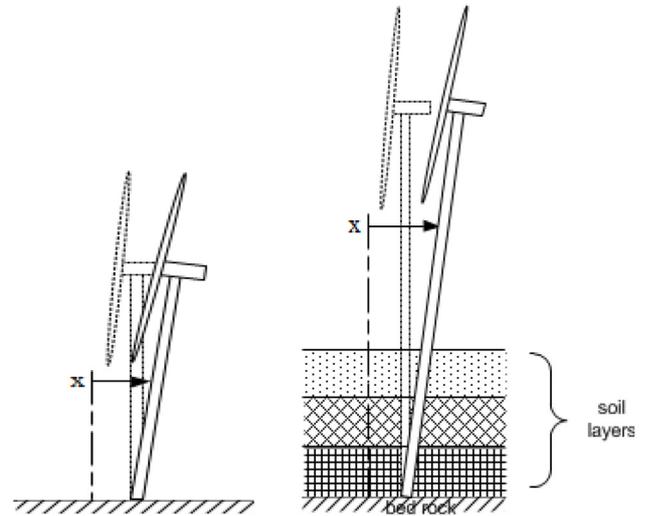
3. 다층지반을 고려한 해상풍력터빈의 지진해석

해상풍력터빈의 지진응답 해석시 지표에서의 증폭된 지진가속도만 고려할 경우와 Pile이 관입되어 있는 다층지반 및 기반암을 고려할 경우에 대한 거동을 그림으로 표현하면 Fig. 1과 같다.

지진 발생 시 지반운동에 의한 구조물의 운동방정식은 아래 식 (4)와 같다. 여기서 M , K 그리고 C 는 질량, 강성, 감쇠계수이며, x 는 지반 거동에 대한 구조물의 상대변위, \ddot{x}_g 는 지반의 가속도, $[1]$ 은 가진 방향의 자유도에 대해서만 1인 벡터이다.

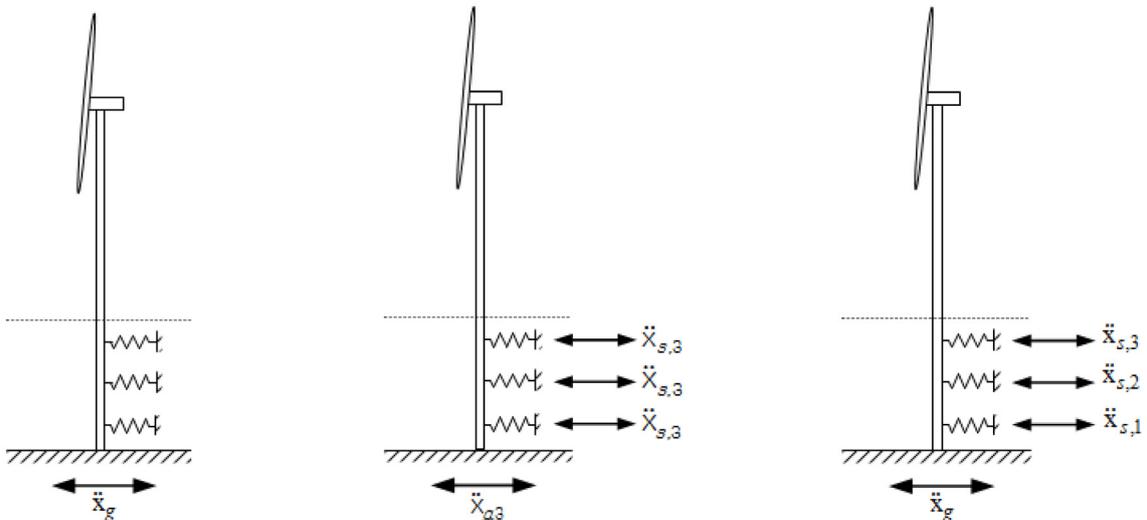
$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M[1]\ddot{x}_g \quad (4)$$

지반-구조물 상호작용에 대해 보다 상세한 결과를 얻기 위해서는 지반을 Solid로 모델링하고, 비선형 물성 및 기초구조물과의 접촉 조건을 정의하여 해석을 수행해야 하지만 절점 및 요소의



(a) Relative to ground surface (b) Relative to bedrock

Fig. 1 Reference point for wind turbine model



(a) Bed rock motion only

(b) Surface motion to all supports

(c) Different motion at each support

Fig. 2 Excitation of offshore wind turbine model with soil spring

증가 그리고 지반물성의 비선형성과 접촉 비선형으로 인해 과도한 해석시간을 필요로 한다. 이에 대부분의 연구에서는 지반을 스프링으로 모델링하는 방법을 통해 구조해석을 수행하고 있으며, 지진가속도를 적용하는 방법은 Fig. 2와 같이 3가지 형태로 설명할 수 있다.

Fig. 2 (a)는 지반가속도를 기반압에만 적용하는 것이다. 이 방법은 지진가속도가 기반압에서 지표로 전달되면서 증폭되는 지반 증폭현상이 고려되지 않았기 때문에 실제 응답보다 작게 추정될 수 있다. Fig. 2 (b)방법은 기반압에서의 지진가속도와 지반물성정보를 사용하여 1차원 자유장 해석을 수행하여 지표에서의 지진가속도를 기초구조물에 동일하게 적용하는 방법이며, Fig. 2 (c)는 앞서 1차원 자유장 해석을 통해 구한 심도별 지진가속도를 각각의 스프링요소의 지지점에 입력하는 방법으로 심도별 지반운동을 반영하여 지반증폭현상을 모사할 수 있는 이상적인 방법이라 할 수 있다. 지반을 선형 스프링으로 가정할 경우 해상풍력터빈 구조물의 운동방정식은 식(5)와 같이 유도할 수 있다. 여기서 K_s 는 지반 스프링에 의한 강성이며, x_s 는 스프링 지지점의 변위이다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + (K + K_s)x = -M[1]\ddot{x}_g + K_s x_s \tag{5}$$

그리고 지반 스프링을 P-y 곡선을 사용하여 비선형으로 고려할 경우 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + K_s(x) = -M[1]\ddot{x}_g + K_s(x_s) \tag{6}$$

여기서, $K_s(x)$ 는 지반 스프링의 지지점이 구속되어있을 때 지반의 복원력, $K_s(x_s)$ 는 지진하중에 의한 지반운동을 스프링 지지점의 변위로 나타낸 것이다. 식 (6)에서 스프링 지지점의 변위 x_s 는 1차원 자유장해석을 통해 얻을 수 있다.

4. 수치해석

4.1 해석대상 모델 및 지반물성

지진 취약도 해석 대상 모델은 NREL(National renewable energy

laboratory) 5MW급 모노파일 기초형태의 해상풍력터빈으로 Fig. 1과 같이 수심은 20m로 가정되었고, 로터직경 126m, 허브높이는 해수면으로부터 90m이다(Jonkman et al., 2009).

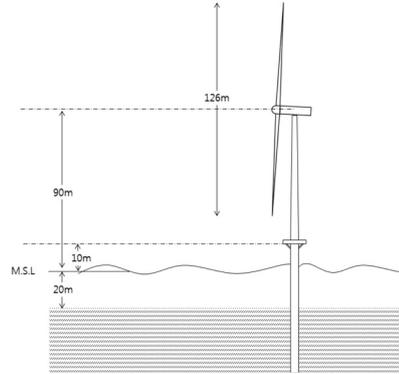


Fig. 3 NREL 5MW Baseline wind turbine

Table 1 Tower properties

Base diameter	6m
Base thickness	0.027m
Top diameter	3.87m
Tip thickness	0.019m
Density(effective)	8500kg/m ³
Young's modulus(E)	210GPa
Yield stress	408MPa
Tangential modulus	763MPa

Table 2 Mass of superstructure

Rotor Mass	110,000kg
Nacelle Mass	240,000kg
Tower Mass	347,460kg
Blade Mass	17,740kg X 3EA

Table 3 Natural frequencies of the turbine with tower(Hz)

Mode	FAST	ADAMS	ANSYS	Description
1	0.3240	0.3195	0.3373	1st Tower Fore-Aft
2	0.3120	0.3164	0.3354	1st Tower Side-to-Side
3	0.6205	0.6094	0.5943	1st Drivetrain Torsion
4	0.6664	0.6296	0.6184	1st Blade Asymmetric Flapwise Yaw
5	0.6675	0.6686	0.6435	1st Blade Asymmetric Flapwise Pitch
6	0.6993	0.7019	0.9692	1st Blade Collective Flap
7	1.0793	1.0740	1.0341	1st Blade Asymmetric Edgewise Pitch
8	1.0898	1.0877	1.0471	1st Blade Asymmetric Edgewise Yaw
9	1.9337	1.6507	1.6431	2nd Blade Asymmetric Flapwise Yaw
10	1.9223	1.8558	1.7577	2nd Blade Asymmetric Flapwise Pitch
11	2.0205	1.9601	1.8334	2nd Blade Collective Flap
12	2.9003	2.8590	3.3457	2nd Tower Fore-Aft
13	2.9361	2.9408	3.0913	2nd Tower Side-to-side

Tower의 단면은 Table 1과 같이 변단면으로 되어 있고, 페인트 칠과 용접, 볼트의 무게가 고려된 유효 단위중량을 사용하였으며, Pile의 직경은 6m, 두께는 0.06m, 단위질량은 7850kg/m³이며 탄성계수는 Tower의 물성과 동일하다. 그리고 상부 구조물인 Rotor, Nacelle, Tower, Blade의 각 질량은 Table 2와 같다.

해석 대상인 해상풍력터빈 모델은 NREL을 참조한 것으로 Ansys를 사용한 모델의 적합성을 판단하기 위해 참조한 연구와 동일한 경계

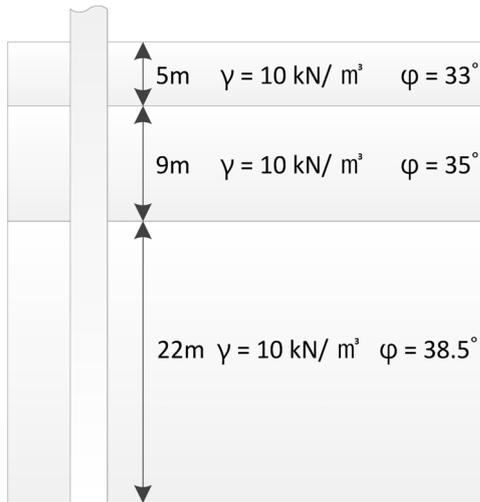


Fig. 4 Sectional view of soil layers

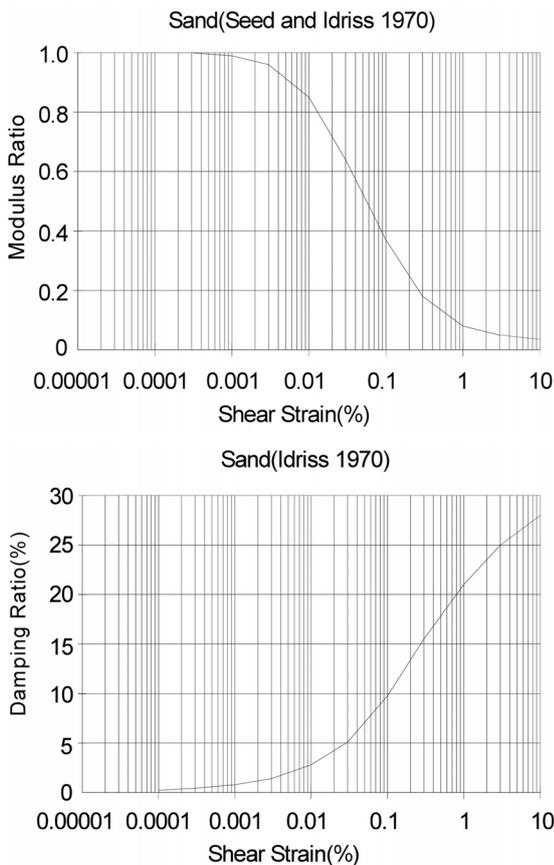


Fig. 5 Nonlinear properties of sandy soil

조건(지반 Rigid)을 사용하여 고유치 해석결과를 확인 하였다(Jonkman and Musial, 2010). Table 3에서 확인할 수 있듯이 해석프로그램에 따른 각 모드별 고유진동수는 유사하게 나타났다.

Pile은 심도 36m 기반암 까지 관입되어 있고, 지층은 3개의 모래층으로 가정 하였으며 각 층별 두께와 유효단위중량, 내부마찰각은 Fig. 4와 같다.

전단탄성계수비와 감쇠비는 전단변형률에 따라 변하며, 이러한 변형률 의존 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 지반의 소성성(Plasticity)이다. 즉, 지반의 종류에 따른 의존 특성을 갖게 된다. 본 연구에서 가정된 지반은 모두 모래지반으로 1차원 자유장해석 시 사용된 전단 변형률에 따른 전단탄성계수비와 감쇠비 곡선은 Fig. 5와 같다.

4.2 유한요소 모델 및 고유치 해석

해상 풍력터빈의 타워는 변단면으로 되어 있기 때문에 총 10개 구간으로 분할하여 각 구간별 단면정보를 입력하여 Beam으로 모델링 하였다. Blade 부분은 사용자정의의 beam 요소를 사용하였으며 48개 구간으로 분할 후 질량 및 방향별 강성정보를 입력하였다(Technical Report NREL /TP-500- 38060,2009). 블레이드와 너셀 그리고 타워간 연결은 Rigid link 요소를 사용하여 Fig. 6과 같이 모델링 하였으며, 사용된 총 요소의 개수는 532개, 절점은 370개 이다(ANSYS User's manual, ver. 12.0).

지반에 의해 지지되는 구조물의 구조해석시 현실적인 결과를 얻기 위해서는 지반과의 상호작용을 고려해야한다. 지반-구조물 상호작용에 대해 보다 상세한 결과를 얻기 위해서는 지반을 Solid로 모델링 하고, 비선형 물성 및 접촉 조건을 정의하여 해석을 수행해야 하지만 절점 및 요소의 증가 그리고 접촉 비선형으로 인해 과도한 해석시간을 필요로 한다. 이에 지반을 비선형 스프링으로 고려하였으며 Pile과 지반 경계부의 비선형 스프링 요소 모델링



Fig. 6 FEM model

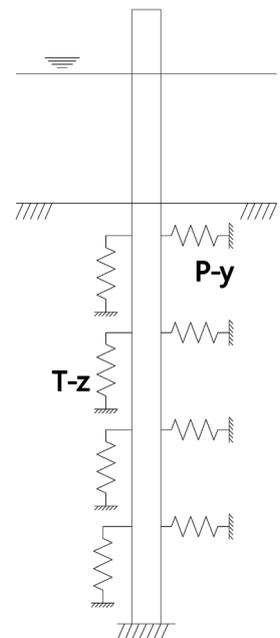


Fig. 7 Soil spring model

개념도는 Fig. 7과 같다.

지반 비선형 스프링은 심도 1m 간격으로 P-y 및 T-z 곡선을 산정하여 반영하였다(API RP 2A-WSD, 2007). 심도 10m, 20m, 30m에 적용된 P-y 곡선은 Fig. 8과 같다. 그리고 타워의 동적 거동시 해수의 영향을 고려하기 위해 해수의 영향이 미치는 타워 부분에는 타워의 내부와 외부에 작용하는 Added mass를 계산하여 부가 하였으며, 수심별 적용된 Added mass는 Fig. 9와 같다(Chopra and Goyal, 1991).

지반을 스프링 모델을 적용하고 해수에 의한 Added mass 영향을 고려한 고유치해석 결과는 Table 4와 같다. Fore-Aft와 Side-to-

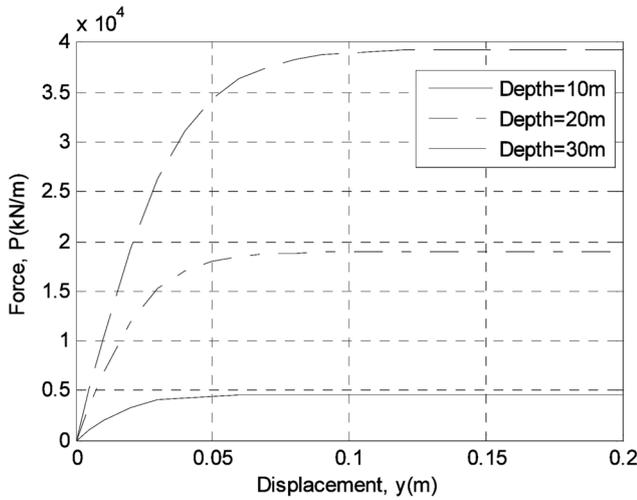


Fig. 8 P-y curve

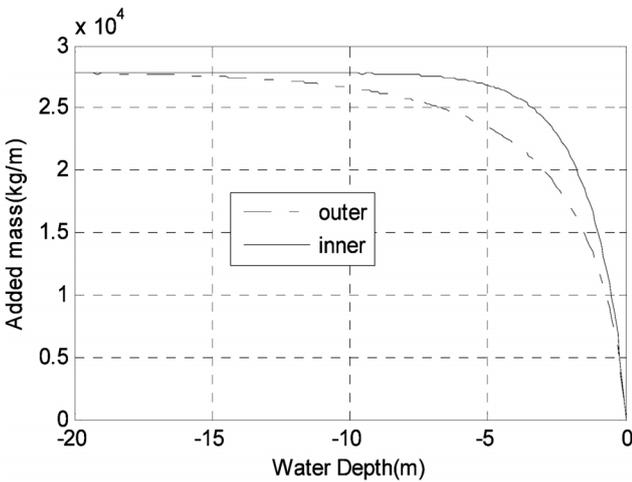


Fig. 9 Added mass

Table 4 Frequencies analysis result

Mode	Freq.(Hz)
1st Fore-Aft	0.234
1st Side-to-Side	0.233
2nd Fore-Aft	1.406
2nd Side-to-Side	1.515

Side 1차 고유진동수를 보면 알 수 있듯이 약 0.23Hz로 저주파의 진동 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

4.3 입력 지진가속도 선정 및 자유장 해석

본 연구에서 지진취약도 해석시 지진하중만을 외력으로 고려하였다. 지진가속도는 내진설계 기준(Ministry of oceans and fisheries, 2005)에 따라 표준 설계응답스펙트럼에 맞게 생성된 인공지진 가속도와 장주기 및 단주기 성분이 탁월한 Hachinohe, Ofunato 지진 가속도를 사용하였다. 해외 지진기록의 경우 Pacific earthquake engineering reserch center(PEER)와 같은 웹사이트의 데이터 베이스를 이용하면 쉽게 접근이 가능하다. 1차 및 2차 고유진동수의 방향별 고유진동수의 큰 차이가 없었기 때문에 지진하중은 해상 풍력터빈의 Fore-Aft 방향의 가속도만을 고려하였고 기반 암에서 발생한 지반운동이 지표로 전달되면서 증폭되는 현상을 고려하기 위해 각 심도별 시간이력 하중으로 입력하였다.

단층운동에 의해 지진이 발생한 경우 지진파는 암반을 통해 토

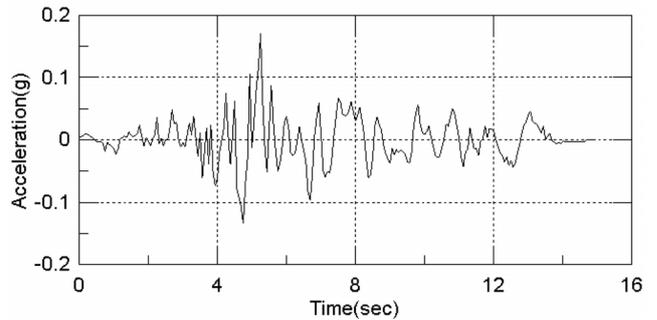


Fig. 10 Hachinohe earthquake

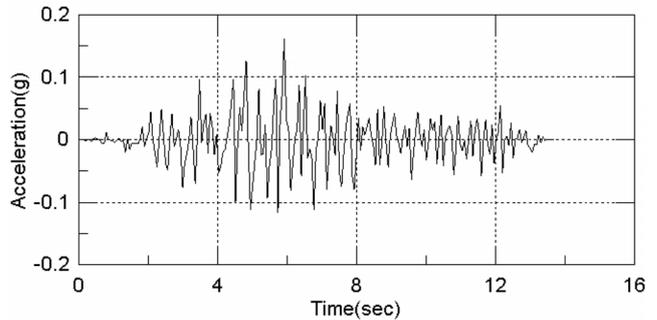


Fig. 11 Ofunato earthquake

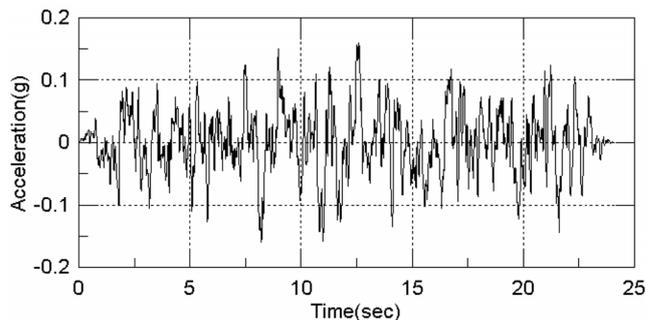


Fig. 12 Artificial earthquake

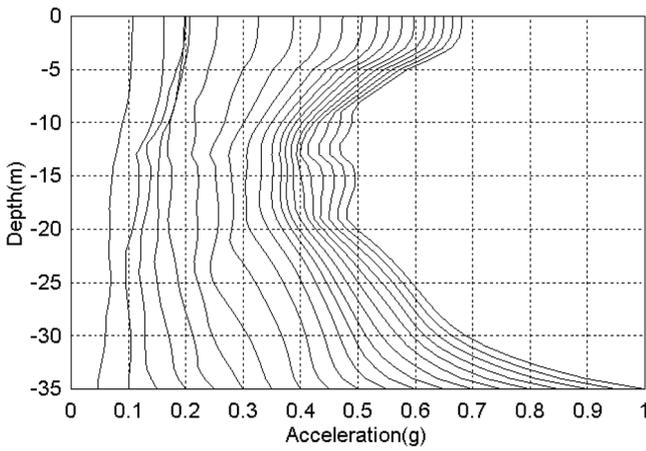


Fig. 13 PGA distribution along depths(Artificial)

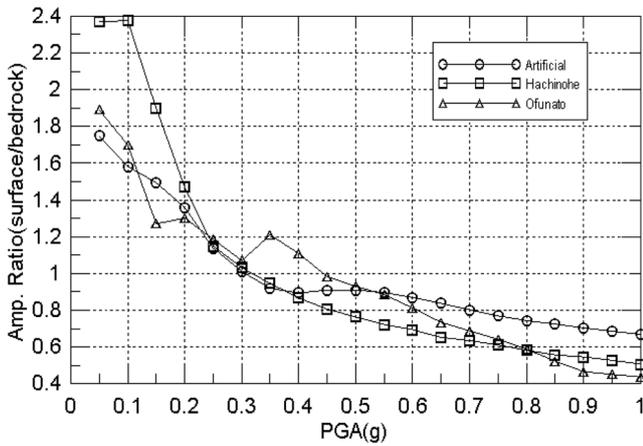


Fig. 14 Surface to bedrock PGA ratios

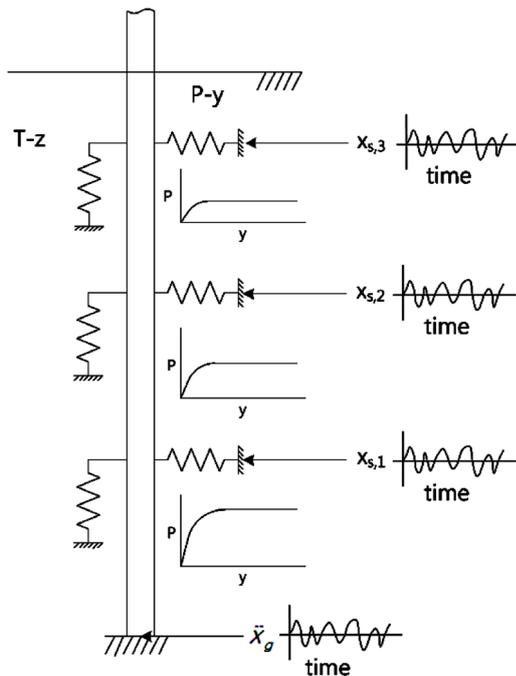


Fig. 15 Seismic loading plan

사지반으로 전파되고, 토층을 통과하면서 지반까지 이르는 과정에서 지반의 물성에 따라 지반증폭현상을 거친 후 상부 구조물에 영향을 미치게 된다. 자유장 해석을 위해 1차원 지반응답 해석 프로그램인 PROSHAKE V1.1을 사용하여 심도별 지진가속도의 시간이력 결과를 계산하였다. Fig. 13은 각 PGA(Peak ground acceleration)별 기반암에서부터 지표까지 가속도 분포를 나타낸 것이며, Fig. 14에서 알 수 있듯이 PGA가 0.3g이하일 경우에는 기반암에서 발생한 지진가속도가 지표로 전달되면서 증폭되는 현상이 발생하나, 기반암의 PGA가 0.3g 이상으로 증가 할 경우에는 가속도 증폭비가 1 이하로 증폭되지 않고 감소하는 것으로 나타났다.

앞서 1차원 자유장해석을 통해 얻은 각 심도별 동적응답 결과를 Fig. 15와 같이 지반 비선형 스프링 요소의 지지점에 시간이력 변위를 입력하여 지반운동을 모사하였고, 기반암에 해당하는 노드에는 해당 PGA에 해당하는 지진가속도를 입력하였다.

4.4 Pushover 해석을 통한 손상기준 결정

취약도 해석시 어떠한 판단 기준에 따라 손상을 판단하는가에 따라 취약도 함수는 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 해상풍력터빈 Transition piece에서 발생하는 항복 및 허용응력 및 이에 해당하는 Nacelle의 한계 변위를 손상의 판단 기준으로 결정하기 위해 Pushover 해석을 수행하였다. Pushover 해석은 비선형 정적해석의 한 방법으로 구조물의 한 방향으로 점진적으로 하중을 증가시키며 가하는 것을 의미하며 하중과 응답을 통해 구조물의 특성을 파악하는 것이다. Fig. 16은 Pushover 해석 결과로 밀면 전단력과 Nacelle의 수평변위 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 16의 Pushover 해석결과에서 알 수 있듯이 수평하중이 4500kN 이상으로 증가할 때 비선형적인 하중-변위 관계가 나타나

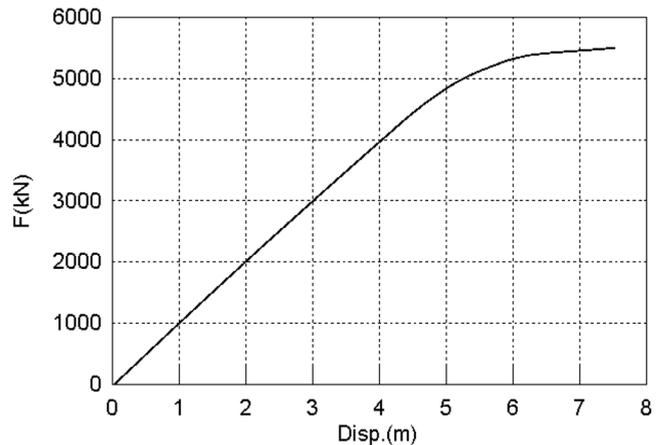


Fig. 16 Force to displacement relation from pushover analysis

Table 5 Model case and Risk criterion

	Loading plan	Description	Criteria
A : Different motion at each support	SY	Yielding Stress	408MPa
	SA	Allowable Stress	204MPa
B : Surface motion to all supports	DY	Yielding Disp.	4.30m
	DA	Allowable Disp.	2.04m

며 이 부분은 탄성영역에서 소성영역으로 변하는 지점이다. 탄성영역을 초과하는 지점에서의 나타난 Nacelle의 변위를 손상기준 결정시 변위 기준으로 결정하였으며, 동적 지진응답 해석시 지진가속도 입력 방법에 의해 크게 두가지 그룹으로 나누면 Table 5와 같

이 8가지의 Case로 정리할 수 있다.

4.5 동적 지진응답 해석

지진 취약도 해석을 위해 각 지진가속도별 PGA를 0.05g씩 1g까지 증가시키면서 동적 지진응답해석을 수행하였다. Fig. 17은 인공지진 가속도 PGA 0.1g에 대한 Nacelle의 시간이력 수평 변위로서 기반암에 대한 상대변위로 나타난 것이다. 응력의 경우 Transition piece에서 최대응력이 발생하였기 때문에 해당위치의 응력결과를 사용하였다. 이와 같이 각 시간이력 해석결과에서 변위 및 응력의 최대값을 정리하면 Fig. 18과 같다.

PGA 증가에 따른 동적 지진응답 해석 결과를 보면 Hachinohe, Ofunato 지진가속도 보다 인공지진가속도에 의한 변위 및 응력결과가 가장 크고 민감하게 나타났으며, Loading plan A가 B보다 변위 및 응력이 전체적으로 크게 나타났다. Fig. 19는 지진가속도의 형태, Loading plan A · B, PGA증가에 따른 Transition piece에서 응력과 Nacelle의 수평변위와의 관계를 Push-over해석 결과와 함께 나타낸 것이다. Loading plan A 일 때 Ofunato, 인공 지진가속도에 대한 응력-변위 곡선은 Pushover해석 결과와 유사한 경향을 보이지만 Hachinohe 지진가속도의 경우에는 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 동적 해석에 의한 영

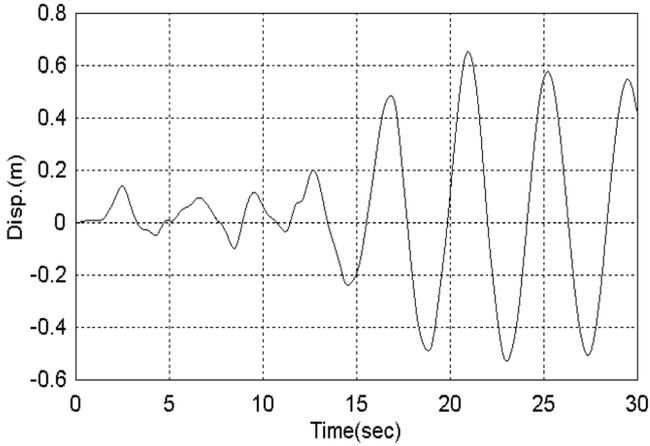
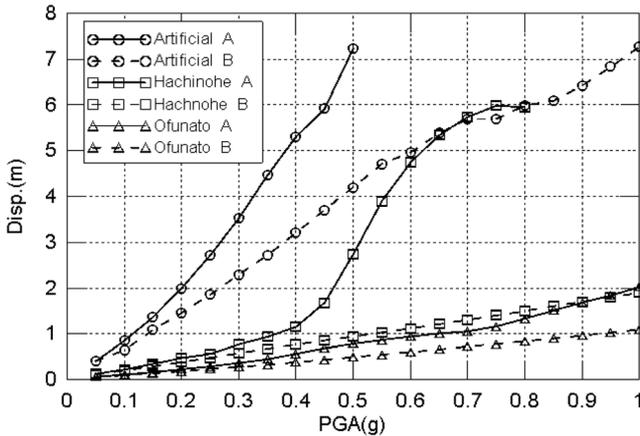
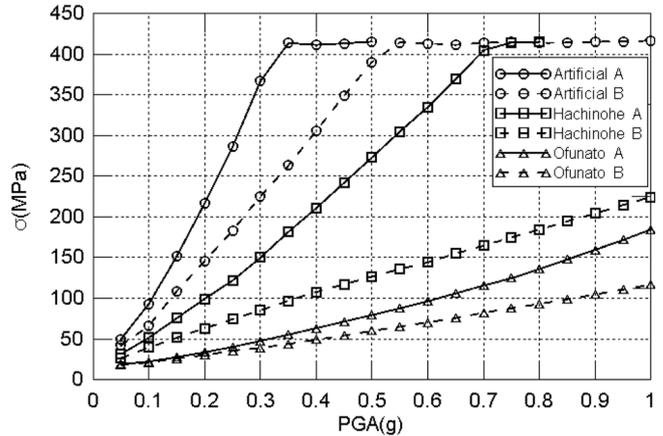


Fig. 17 Nacelle displacement under Artificial ground acceleration (PGA=0.1g)

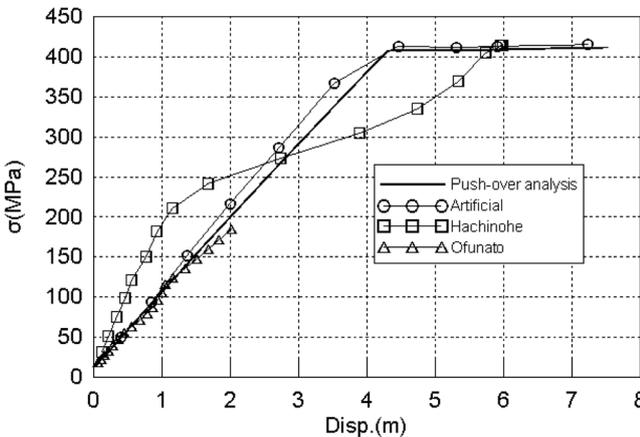


(a) Nacelle displacement

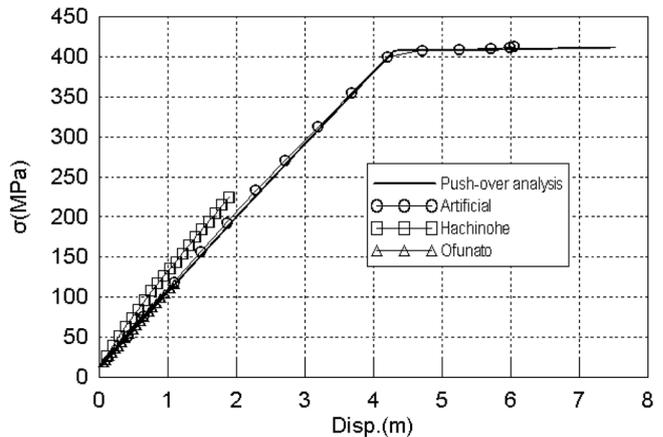


(b) Stress at transition piece

Fig. 18 Maximum nacelle responses

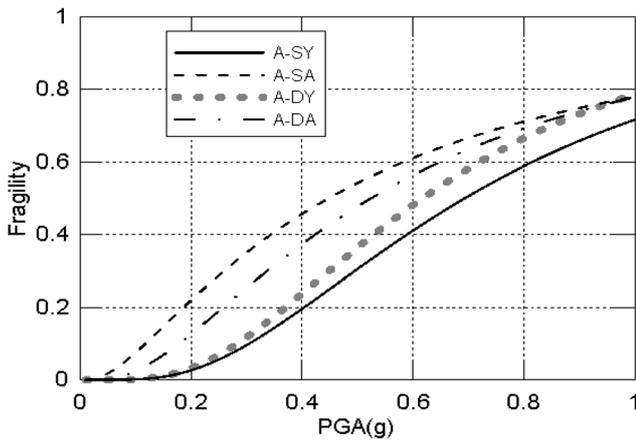


(a) Loading plan A

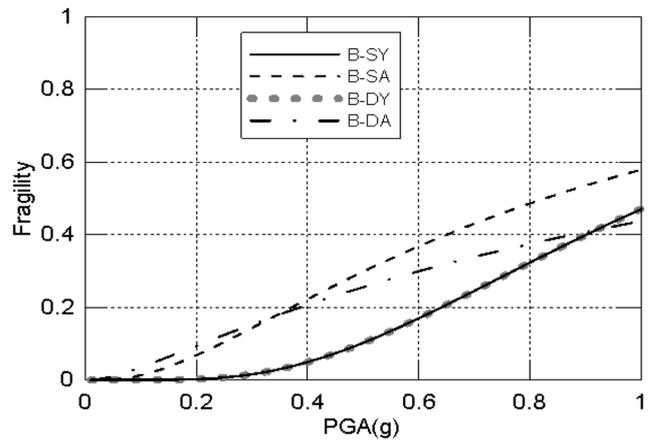


(b) Loading plan B

Fig. 19 Transition piece stress vs. nacelle displacement



(a) Loading plan A



(b) Loading plan B

Fig. 20 Seismic fragility curves for offshore wind turbine

Table 6 Median and log-standard deviation

Case	median(g)	log-Std.(g)	
A	SY	0.6925	0.6408
	SA	0.4473	1.0404
	DY	0.6169	0.6071
	DA	0.5238	0.8411
B	SY	1.0436	0.5799
	SA	0.8271	0.9509
	DY	1.0436	0.5799
	DA	1.2466	1.3902

향도 있었지만 지반증폭 현상을 모사하기 위해 심도별 지반운동을 반영하였기 때문에 지반증폭현상에 의한 영향으로 판단된다.

4.6 지진취약도 곡선 산정 및 분석

해상풍력터빈의 지진응답 해석결과와 Pushover해석을 통해 결정된 손상 판단기준에 따라 지진취약도 해석을 수행하여 지진취약도 함수의 중간값과 대수표준편차를 Table 6과 같이 계산하였으며, Fig. 20은 이에 해당하는 취약도 곡선이다.

지반증폭현상을 고려한 경우 즉, Loading plan A가 B보다 지진에 의한 취약도가 크게 나타났다. 응력 및 변위기준에 의한 취약도 곡선은 Loading plan별로 각각 유사하게 나타났다. 이는 손상에 대한 판단기준을 Pushover해석을 통해 항복 및 허용응력과 그에 상응하는 변위로 산정하였고, Fig. 17에서 알 수 있듯이 지진응답해석 결과가 Pushover해석 결과와 유사한 경향을 보이기 때문이다. 취약도 곡선에서 차이를 보이는 부분은 지진가속도 형태별 응답결과가 손상 판단기준으로 사용된 Pushover해석 결과와 다른 양상을 보일 경우 즉, 변위기준은 초과하지 않았으나 응력기준을 초과하는 경우 또는 그 반대일 경우에 해당된다.

5. 결 론

모노파일 기초 해상풍력터빈의 지진해석을 수행하였으며 지진응답을 이용하여 취약도곡선을 산정하였다. 해석결과 압반의 PGA

에 따라 해저지반의 각 층별 PGA가 매우 높은 영향을 받는 것으로 확인되었다. PGA가 작을 때는 압반가속도에 대한 해저면 가속도의 비가 높게 나타나지만 PGA가 커짐에 따라 이 비율이 점점 작아졌다. 이것은 지반변형이 작을 때는 토질물성이 선형영역에 존재하지만 지반변형이 클 때는 비선형영역으로 진입하기 때문이다. 따라서, 해상풍력터빈의 지진해석을 위해서는 1차원 자유장해석에서 구한 각 층별 지진입력을 사용해야한다. 취약도 해석 시 손상기준으로는 응력과 변위 기준을 사용하였다. 허용변위의 설정은 정적 Pushover해석으로 구하였으며 비록 정적변위 기준이지만 동적 취약도곡선에 유용하게 사용될 수 있음을 보였다. 취약도 분석 결과 층별로 산정된 지진가속도를 고려한 경우가 층별로 동일한 지진가속도를 고려한 경우보다 해상풍력터빈의 취약성이 높은 것으로 평가되었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 에너지 기술개발 사업임(No. 20123030020110).

References

ANSYS, Inc., 2009. ANSYS User's Manual, 12.0.
 American Petroleum Institute(API), 2007. Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design.
 Chopra, A.K., Goyal, A., 1991. Simplified Earthquake Analysis of Intake-Outlet Towers. Journal of Structural Engineering 117(3), 767-788.
 Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scoot, G., 2009. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. NREL/TP-500-38060, NREL.
 Jonkman, J., Musial, W., 2010. Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind

- Technology and Deployment, NREL/TP-500-48191, NREL.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T., 2000. Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), 1224-1231.
- Berkeley Univ. of California, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). [Online] Available at: <<http://peer.berkeley.edu/>> [Accessed 19 Mar. 2012]
- Ministry of Oceans and Fisheries, 2005. *Engineering Standards Commentaries Port and Harbor Facilities*.
- Kim, S.H., Kim, D.K., 2005. Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Caisson-Type Breakwaters, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(1), 26-32.