Journal of Korea Society of Disaster Information Vol.10 No.2 ▌pp. 244 - 252

Available online at www.kosdi.or.kr

버켓기초를 가진 해상풍력타워의 지반-구조물 상호작용해석

Soil-structure interaction analysis for the offshore wind tower with bucket foundation

Gyehee Lee[a,*], Sejeong Kim[b,1], Tranduc Phu[c,2]

a Professor, Department of Ocean Civil & Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University, 91 HaeYangDaeHagRo, Mokpo, Chonnam 530-729 Republiv of Korea

b Engr. Plant Structure Team, Chungwoo Co., 361, Simindaero, Dongangu, Anyangsi, Gyeonggido, Republiv of Korea

c Doctoral student, Department of Ocean Civil & Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University, 91 HaeYangDaeHagRo, Mokpo, Chonnam 530-729 Republiv of Korea

A B S T R A C T

In this study, seismic responses of the offshore wind tower supported by bucket foundation are analyzed in consideration of soil-structure interaction. The program SASSI is used as analyzing tool and an artificial seismic input for soft soil is used as input motion. The H/R ratio of bucket, the stiffness of bucket foundation and the soil stiffness are considered as parameters and its effects are estimated. The responses of structure are obtained at the base and the nacell. As results, the effects of H/R ratio, the stiffness of bucket and the stiffness of site are generally denoted different response tendency at the base and the nacell. However, these whole responses of the base and the nacell are much lager than that of rock site. Therefore, the consideration of this phemomia affect to the response of offshore wind tower with bucket foundation largely.

KEYWORDS

bucket foundation
offshore wind tower
soil-structure interaction
H/R ratio
stiffness
soil stiffness

본 연구에서는 버켓기초로 지지된 해상풍력타워의 지진응답을 지반-구조물 상호작용을 고려하여 해석하였다. 해석프로그램으로는 SASSI를 사용하였으며 연약지반에 대해 생성된 인공지진파를 입력으로 사용하였다. 버켓기초의 형상과 강도를 매개변수로 하여 각 매개변수들의 영향을 파악하였다. 구조물의 응답은 타워의 하부와 나셀위치에서 얻어졌으며 응답스펙트럼으로 비교하였다. 해석결과 형상비, 버켓의 강도, 지반의 강도에 따라서 기초부와 나셀부에서 다른 경향의 응답을 보였다. 그러나 이러한 모든 지반-구조물상호작용의 고려는 암반으로 가정한 거동에 비하여 월등히 큰 응답 값을 보여 이의 고려가 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 지진거동에 큰 영향을 미치는 것을 파악할 수 있었다.

버켓기초
해상풍력타워
지반-구조물 상호작용
버켓기초형상비
버켓기초강도
지반강도

ⓒ 2014 Koea Society of Diaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-61-240-7314. Fax. 82-61-240-7341. Email. lghlsk@mmu.ac.kr

1 Tel. 82-31-345-1242 Email. chungcon.ksj@gmail.com

2 Tel. 82-61-240-7340 Email. phutranduc@gmail.com

ARTICLE HISTORY

Recieved Mar. 11, 2014
Revised Mar. 17, 2014
Accepted Jun. 27, 2014

1976-2208 ⓒ 2014 Korea Society of Disaster Information All rights reserved.

1. 서 론

기존의 화석연료에 의존하던 에너지개발의 무게중심이 신재생에너지 쪽으로 방향을 이동하면서 대표적인 신재생에너지인 풍력발전에 대한 관심이 커지고 있다. 특히 해상풍력발전은 육상에 비하여 양질의 바람을 이용할 수 있고 대형화가 유리하며 육상에서 문제되는 소음이나 기타 환경 문제를 피할 수 있으므로 북유럽 쪽에서는 대형 해상풍력발전 단지가 실용화가 시도되고 있다. 이러한 해상풍력개발의 가장 큰 문제점의 하나는 해상에 설치되는 풍력발전타워의 기초이다. 일반적으로 천해에 설치되는 풍력타워의 기초는 육상과 동일한 구조가 적용되나 수심이 깊어질수록 이러한 기초의 적용은 비경제적이므로 다양한 형식의 기초가 새롭게 적용되고 있다. 그 중 최근 주목받고 있는 기초형식의 하나로 버켓기초(bucket foundation) 또는 버켓케이슨(bucket caison)이 있다.(Morten Liingaard, 2006)

이 기초형식은 한쪽 끝이 열린 원통형 기초를 지반에 관입시켜 상부구조물을 지지하는 형식으로 관입시 음압을 이용하여 관입력을 얻는다.(Fig. 1) 이 기초는 단순한 구조이고 시공 장비가 다른 형식의 기초에 비해 상대적으로 간단하여 50m정도의 수심에 적용성이 높은 것으로 알려져 있다.

지반-구조물 상호작용의 해석에 대한 연구는 지진시 지반의 영향을 고려하기 위한 다양한 방법이 개발되어왔다. 연구의 핵심은 무한영역의 고려와 무한영역으로의 에너지소산기구를 적절히 표현하는 방법에 관한 것이다. 연구자들의 경계의 모델링 방법에 따라 다양한 기법의 지반-구조물 상호작용해석기법을 개발하였고(Wolf , 1997, White et al., 1969, Tassoulas et al.., 1983, Luco, 1974, Chen et al., 1986) 이를 기반으로 여러 가지 종류의 지반-구조물 상호작용해석 프로그램들이 작성되어 원전이나 교량 등의 실제 설계업무에 사용되고 있다.

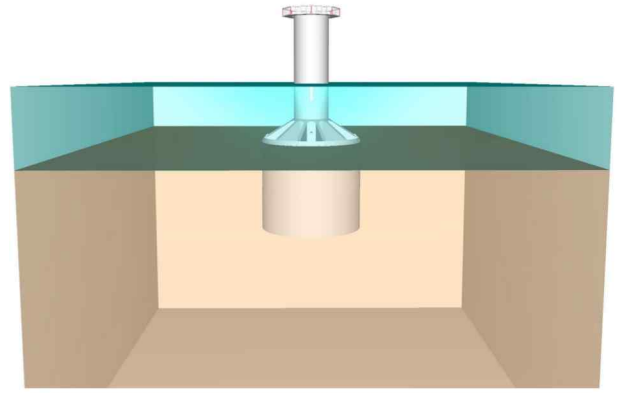


Fig. 1. Concept of a Bucket Foundation (Morten, 2006)

버켓기초를 가진 구조물에 대한 지반-구조물 상호작용의 연구는 다른 지상구조나 플랜트 구조등에 비하여 상대적으로 제한적이다. 상부구조의 질량이 중요한 거동을 보이는 일반적인 토목구조물의 경우와 달리 버켓기초는 최근까지 앵커나 방파제의 기초등 상부구조물의 응답이 중요하지 않은 구조물에 사용되는 경우가 많았고 동적인 거동보다는 정적인 지지력이 중요한 설계요인이었기 때문에 이러한 지반-구조물 상호작용해석의 적용은 활발하지 않았다. 버켓기초에 대한 지반-구조물 상호작용 중 일부 연구 성과를 소개하면 다음과 같다.

Wolf등이 개발한 SBFEM(scaled boundary finite element method)을 사용하여 지반의 물성치가 멱함수의 형태로 변하는 비동질 반무한공간공간의 강도행렬을 산정하고 이를 이용하여 버켓기초의 거동을 산정하는 연구가 진행되었다.(Doherty et al., 2003) 이 연구를 지중에 있는 원형기초로 확장하여 매입된 유연한 버켓기초의 거동을 산정하였다.(Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1408-1508)이 들의 연구에 기초하여 비동질 반무한 평면에서의 동적강성행렬에 대한 연구도 수행되었다.(Lee, 2010)

이와는 다른 방법으로 층상지반의 동적강도행렬을 cone metod로 구하고 이를 이용하여 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 동적해석을 수행한 연구도 보고되었다.(Wolf et al., 2004) 유한요소법과 경계요소법을 사용하여 버켓기초의 동적강도를 구하는 연구가 수행되었으며 얻어진 동적강도행렬을 이용하여 집중파라메터모델을 개발하고 이를 이용하여 실제 계측에서

얻어진 구조물의 응답을 모사하는 연구도 수행되었다.(Morten , 2006) 최근에 해상풍력타워의 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진해석결과로는 지반을 집중파라메터로 모델링하여 해석을 수행한 결과가 보고되어 있다.(Guangling et al., 2008)

이러한 연구들의 특징은 지반의 동적특성을 집중화시켜 전체 해석모델을 단순하게 고려하려는 노력들이다. 이는 해상풍력타워의 구조계가 비교적 단순하고 날개나 바람에 의한 진동 등, 외부의 진동에 대한 응답을 산정하는 것이 설계의 중요한 고려사항으로 취급되었기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 지진해석을 지반-구조물 상호작용을 고려하여 그 응답의 특성을 파악하고자 하였다. 기존의 업계에서 실용성이 검증된 해석프로그램을 사용하여 지반의 층상구조를 고려하고 버켓의 형상이나 구조강성 등의 변화에 따른 내진응답의 민감성을 분석하였다. 이러한 분석결과는 이후 유사한 형태를 가진 구조물의 설계나 유지관리에 참조할 수 있을 것이다.

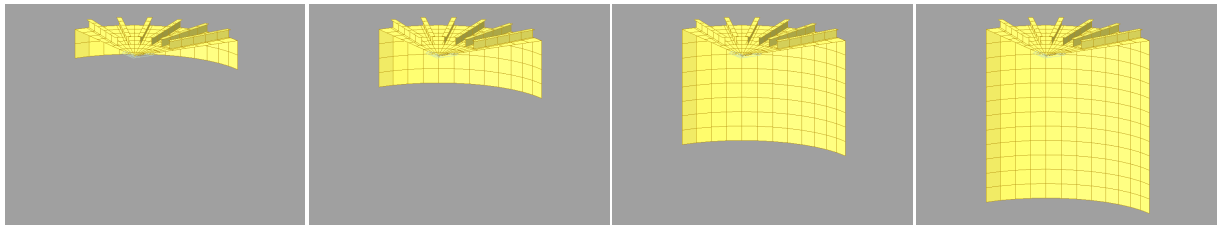
2. 대상구조물

2.1 버켓기초

해석에 고려한 버켓기초의 제원은 반경이 10m이고 측벽의 깊이는 해석의 매개변수로 가정하여, 최소 2.5m에서 최대 15m로 가정하였다. 해석에 사용된 버켓기초는 강재로 제작되는 것을 가정하였다. 버켓기초의 상부는 충분한 보강재로 보강하였으며 상부의 풍력타워가 위치하는 부분은 강체보를 이용하여 자유도를 구속하여 일체거동을 나타내도록 하였다. 버켓기초의 측벽부는 관입시 좌굴이나 기타 지지력조건을 고려하여 두께가 결정되나 벽체의 강성이 지반-구조물상호작용에 미치는 영향을 고려하기 위하여 2cm의 두께를 가진 것으로 가정하고 이의 강성을 증가시키며 응답의 변화를 관찰하였다.

해석모델은 대칭성을 이용하여 1/4모델로 구성하였다. 해석시 지반-구조물 상호작용의 효과를 원활하게 고려하기 위하여 지반의 전단파 속도와 최대 진동수를 고려하여 최대요소망의 크기가 1.3m이내가 되도록 요소망을 구성하였다.

버켓기초의 형상비(깊이/반경)의 영향을 분석하기 위하여 고려한 제원의 범위에서 총 4개의 버켓기초에 대한 모델링을 수행하였다. Fig. 2에서 이와 같이 구성한 버켓기초의 해석모델을 나타내었다. 실제 해석에서는 버켓기초내부의 지반도 동시에 모델링된다.



(a) H/R =0.25 (b) H/R =0.50 (c) H/R =1.00 (d) H/R =1.50

Fig. 2. Shapes of Bucket Models(a quater model)

2.2 풍력타워

해석에서 고려한 풍력타워는 5Mw의 용량을 갖는 것으로 가정하고 기존의 연구결과로부터 개략적인 제원을 추정하였다.(Table. 1) 풍력타워구조는 원형의 강관구조로 가정하여 단면상수를 산정하였다. 타원의 상부에는 풍력발전기와 날개가 설치되는 나셀부는 무게를 2800kN으로 가정하고 집중질량으로 추가하였다. 상부 나셀부의 비대칭형상의 영향은 고려하지 않았다.

버켓기초의 모델에서 대칭성을 이용한 1/4모델을 사용하였으므로 해석프로그램에 입력되는 단면의 값은 실제 단면특성값의 1/4을 적용하여 수정 입력하였다.

Table 1. Dimensions and Sectional Properties of Wind Tower Used in Analysis

Section	1	2	3
Length(m)	30	40	40
Diameter(m)	6	4.96	3.8
Thickness of shell(mm)	60	23.1	19
A(m^2)	1.11	0.35	0.23
I(m^4)	4.93	1.11	0.47
Modified A(m^2)	0.27	0.08	0.05
Modified I(m^4)	1.23	0.27	0.22

2.3 지반의 층상구조

지반의 층상구조는 Table. 2에서 보이는 바와 같이 반무한공간위에 사질토 지층이 놓여있는 것으로 가정하였다. 현재 버켓기초가 시공되는 시공환경은 해상이므로 지반의 물성치는 연약지반에 준하여 가정하였다. 이와 상대적으로 강성이 큰 지반을 모델링하기 위하여 연약지반의 경우에서 상부의 연약층이 제거된 경우를 상대적인 강성지반의 경우로 설정하여 해석을 수행하였다.

이와 같은 층상구조에서 가장 지반강도가 작은 상부지층의 두께가 5m이기 때문에 형상비가 0.5보다 작은 경우는 상부의 연약지층에 의하여 버켓기초가 지지되고 형상비가 1.0이하인 경우에는 첫번째 지층보다 상대적으로 강성이 큰 지반과 동시에 버켓기초를 지지하게 된다.

지반의 강성이 매우 커 지반-구조물 상호작용의 영향을 무시할 수 있는 경우를 참조해로 사용하기 위하여 암반지반에 버켓파일이 설치되는 경우를 가정하여 해석을 수행하였다. 이 때 지반의 전단파속도는 1300m/sec이상으로 가정하였다. 이러한 강도를 가진 암반에 지지되더라도 약간의 지반-구조물 상호작용은 일어날 것으로 판단되나 실질적으로 지반-구조물 상호작용의 영향은 미미할 것으로 가정하고 참조해로 사용하였다. 그러나 이러한 지반조건에 실제 본 연구의 대상인 버켓기초가 시공되는 경우는 버켓기초의 설계개념이나 시공여건상 실제현장에서는 발생하지 않을 것이다.

Table 2. Soil Layers

	Layer	Th. *(m)*	Unit Weight (KN/m^3)	Shear Wave Speed ($m/\sec$)
Soft Site	1	5	16.562	89.7
	2	10	18.914	155.8
	3	20	24.716	224.5
	Half space	∞	23.716	317
Hard Site	1	5	18.914	155.8
	2	10	24.716	224.5
	Half space	∞	23.716	317

3. 지반-구조물 상호작용해석

3.1 해석프로그램

본 연구의 지반- 구조물상호작용해석에는 프로그램 SASSI(Lysmer et al., 1974)가 사용되었다. SASSI는 유연체적법을 이용하여 지반-구조물 상호작용해석을 진동수영역에서 수행하는 프로그램으로 1980년대 처음 개발된 이래 교량이나 플랜트 분야에서 대표적인 지반-구조물 상호작용 해석프로그램으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 SASSI2000버전(SASSI

2000 User Manual Rev. 1 , 1999) 이 사용되었다. SASSI의 입력모델 작성 시 다음과 같은 점을 고려하여 작성하였다.

- 입력 가속도시간이력은 충분한 지속시간을 가져야 한다. 특히 시간이력의 뒷부분에 충분한 영(zero)의 가속도 값을 가져야 한다.

- SASSI 프로그램 내에서 진동수 간격 Δf는 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t \times N_{fft}} \quad (1)$$

여기서 Δt는 주어진 입력시간의 시간간격, N_{fft}는 입력하중의 샘플링 수이다. 이러한 진동수 번호를 이용하여 전달함수를 보간하므로 적절한 수와 분포를 가진 진동수번호가 사용되어야 한다.

- 층상지반의 두께 및 절토된 부분의 인접한 두 절점 사이의 최대거리는 가장 높은 진동수에 해당하는 파장의 1/5를 넘지 않아야 한다.

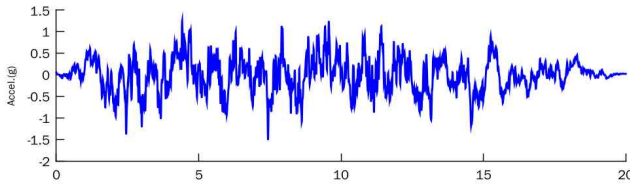
$$h_{\min} = \frac{V_s}{5 \times f_{NF}} \quad (2)$$

여기서 V_s는 전단파속도, f_{NF}는 해석에서 고려하는 진동수의 최댓값이다.

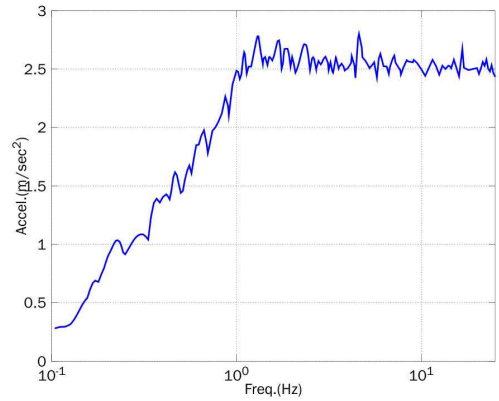
3.2 입력지진

해석에 사용된 지반입력운동은 교량의 지진해석을 위한 인공지진파이다.(Kim et al., 2004) 모두 4가지 종류의 지반에 대한 지진파중 장주기에 큰 증폭특성을 가진 지진파(S4)중의 지진파를 선정하여 해석에 사용하였다. 이는 풍력타워가 교량에 비해 상대적으로 장주기의 진동특성을 가진 점을 고려하였다. 이 지진파는 지표면에 정의된 지진파이므로 고려된 상부지층에 입력되는 것으로 모델링하였다. 본 해석에서 사용하는 지진의 최대지반가속도는 현재 지진해석이 널리 적용되고 있는 교량구조에 기준하여 0.154g의 수준으로 가정하였다.

그림 2와 그림 3에 각각 입력지반가속도의 파형과 응답스펙트럼을 나타내었다.



(a) Acceleration Time History

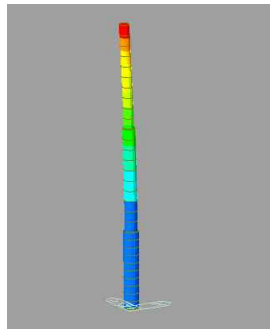


(b) Acceleration Response Spectrum(5% damping)

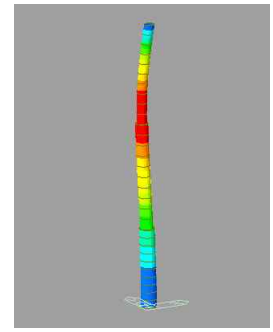
Fig. 3. Input Motion

3.3 고유치해석

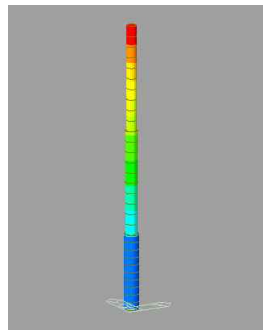
해석시 얻어지는 주요 진동모드의 형상은 Fig. 4에서 보이는 바와 같다. 대상구조물은 수직축에 대하여 대칭인 구조물이기 때문에 수평방향의 진동모드는 2개의 동일한 모드가 직교형태로 나타난다. 풍력타워자체는 단순보의 거동을 보이기 때문에 이러한 소수의 진동모드에 대부분의 질량이 참여하는 경향을 보인다.



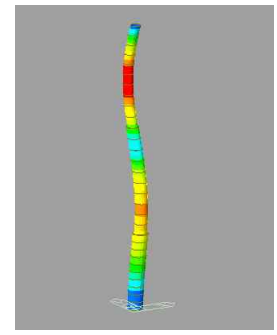
(a) mode 1&2 (0.089Hz)



(b) mode 3&4 (2.197Hz)



(c) mode 5 (2.467Hz)



(d) mode 6,7 (5.707Hz)

Fig. 4. Vibration Modes of Wind Tower in Fixed Base Model

4. 해석결과

4.1 형상비

버켓파일의 형상비에 대한 기초와 나셀부에서의 응답을 응답스펙트럼으로 Fig. 5, 6에서 보이는 바와 같이 비교하였다. 버켓파일의 기초에서 얻은 응답은 지반-구조물계의 응답을 포함하고 있기 때문에 입력운동과는 거동이 일치하지 않는다. 그러나 입력운동과 유사한 응답을 보여주고 있다. 진동수에 따른 응답은 1Hz미만의 구간에서는 거의 동일한 응답을 보이고 있고 1Hz에서 10Hz의 구간에서는 형상비가 커질수록 응답이 작아지는 경향을 보이고 있다. 다만 10Hz지점에서의 응답은 이러한 경향이 역전되어 나타나면 특히 형상비가 1.5인 경우의 응답은 다른 형상비의 응답스펙트럼에 비하여 월등히 큰 첨두값을 보여주고 있다.

나셀부에 대한 응답스펙트럼은 크게 2개의 첨두값을 갖는다. 하나는 약 0.34Hz에서 발행하며 다른 하나는 2.7Hz에서 발생한다. 첫번째 첨두값에서는 모든 경우의 응답이 거의 동일한 크기를 가지나 두 번째 첨두에서는 형상의 비가 커질수록 첨두응답값의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 형상비가 0.25인 경우 $4.93m/\sec^2$의 첨두값을 나타내지만 형상비가 1.5로 지반에 깊이 관입된 경우 이 값은 $3.54m/\sec^2$값으로 30%가까이 감소된다.

그러나 이들 값들은 고정지반을 가정하고 해석된 응답에 비해서는 매우 큰 값이다. 고정지반에 설치된 것으로 가정된 풍력타워구조물의 최대응답은 2.64Hz에서 발생하고 이때의 가속도응답스펙트럼의 값은 $1.2525m/\sec^2$으로 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우에 비하여 매우 작은 값이다. 전반적으로 상부구조를 지지하는 기초부의 강도가 증가할수록 상부의 응답이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 지반의 강도가 크지 않은 곳에 시공되는 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 해석에서는 지반의 고려가 매우 중요한 사항이라고 판단된다.

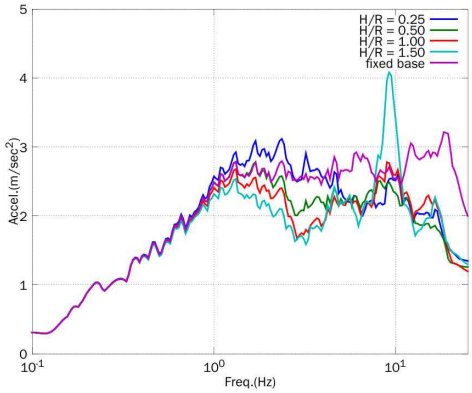


Fig. 5. Base Response Spectrum as H/R Ratio

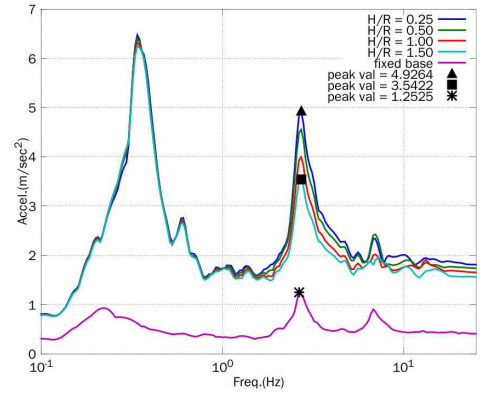


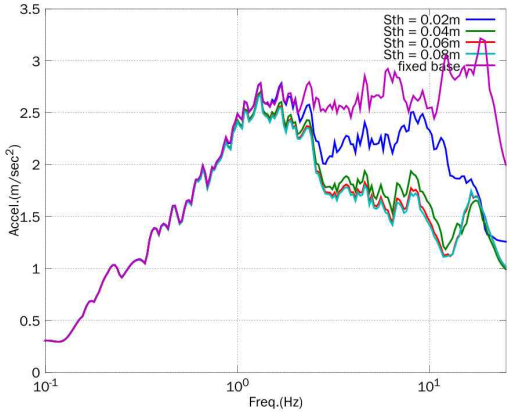
Fig. 6. Nacell Response Spectrum as H/R Ratio

4.2 버켓의 강도

버켓강도에 따른 응답의 변화는 Fig. 7, 8에서 보이는 바와 같다. 평판의 강도는 두께의 세제곱에 비례하고 버켓기초의 모든 부재는 평판으로 모델링 되었으므로 두께의 세제곱에 비례하여 탄성계수를 증가시키는 방법으로 버켓의 강도변화를 고려하였다. 버켓의 강도에 따른 응답의 변화는 버켓의 형상에 따른 변화와는 반대로 기초부분에서의 변화가 크고 나셀부에서의 영향은 작게 나타났다. 기초부에서

버켓강도의 영향은 기본 강도를 가진 경우에 고정기초인 경우에 비하여 3Hz이상의 진동수 영역에서 많은 응답의 감소를 보인다. 버켓의 강도가 8배로 증가하는 경우에도 마찬가지의 응답감소를 보이지만 이후로 버켓강도가 증가되는 경우에도 응답의 추가적인 감소는 발생하지 않는다. 이러한 현상은 지반의 강도에 대해 어느 정도 이상의 강도를 가진 버켓기초는 상대적인 강체로 거동하는 것으로 보인다.

버켓강도의 변화는 버켓의 형상변화와는 달리 동일한 전체 풍력타워구조물을 지지하는 지층의 변화를 수반하고 있지 않기 때문에 나셀부에서의 응답변화는 형상비정도의 영향을 보이지 않는다. 기본 강도인 경우 나셀부의 응답은 4.5543 $m/\sec^2$의 첨두값을 나타내지만 최대강도를 가정한 경우 이 값은 3.9611$m/\sec^2$ 값으로 약 15% 감소된다. 나셀부의 두번째 첨두값에서도 기초부의 응답과 같이 버켓이 기본강도를 가진 경우와 강재의 두께가 2배로 증가된 경우를 가정한 경우에는 차이를 보이지만 추가적인 버켓강도의 증가에는 뚜렷한 응답의 변화를 보이지 않는다. 따라서 기초 자체의 강도가 증가되는 경우는 풍력타워의 상부보다는 하부의 응답에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.



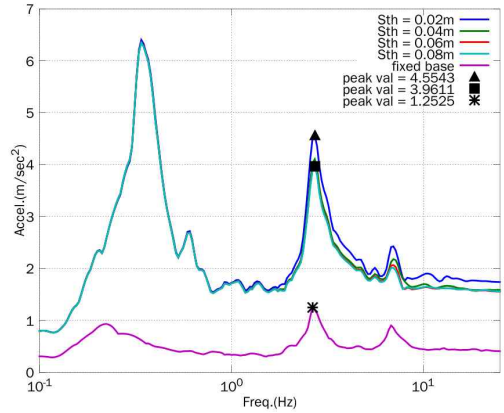


Fig. 7. Base Response Spectrum as Bucket Stiffness Fig. 8. Nacell Response Spectrum as Bucket Stiffness

4.3 지반의 강도

지반강도의 변화에 따른 기초부와 나셀부에서의 가속도 응답스펙트럼의 변화는 Fig. 9와 Fig. 10에서 보이는 바와 같다. 지반강도의 영향에 있어서 기초부의 응답의 특징은 지반의 강도가 증가했음에도 특정한 진동수 범위의 응답이증가하는 경향을 보이는 것이다. 이러한 현상은 버켓의 형상비의 영향에 의해 특정한 진동수에서 응답의 증폭을 보인 Fig. 5의 경우와 유사한 응답이다. 이는 상부구조물을 지지하고 있는 지반의 강도가 증가하여 특정한 진동수범위의 응답에 공진현상을 보인 것으로 판단된다. 이러한 공진현상은 상부타워구조물의 진동수 특성과는 연계성보다 버켓부분의 동적거동과 연관이 있는 것으로 추정된다.

지반의 강도증가에 의한 나셀부의 응답은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 특히 이전의 매개변수변화에서는 영향을 받지 않았던 첫번째 첨두값의 감소가 크게 나타났다. 이들 첨두값들은 크기의 변화뿐 아니라 첨두값이 일어나는 진동수에서도 변화를 보였다. 그러나 이러한 응답 값의 감소에도 불구하고 나셀부의 응답은 지반-구조물상호작용의 영향을 무시할 수 있는 참조해에 비하며 매우 큰 값을 보인다. 따라서 연약지반에 주로 설치되는 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 거동을 평가하기 위해서는 지반-구조물상호작용의 영향이 주요한 매개변수로 작용할 것으로 보인다. 또한 기존의 지반-스프링 모형은 버켓파일 자체의 형상이나 강도에 변화에 의한 응답의 변화를 고려하기 쉽지 않으므로 정확한 버켓기초의 형상과 지반조건을 고려한 지반-구조물의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

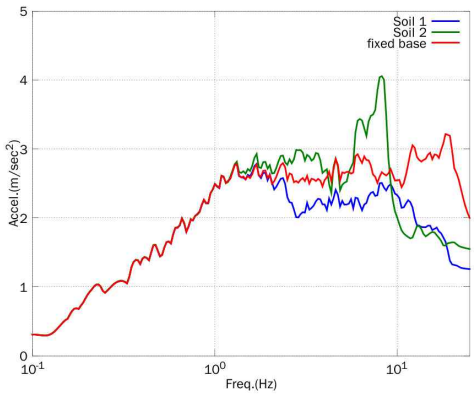


Fig. 9. Base Response Spectrum as Site Stiffness

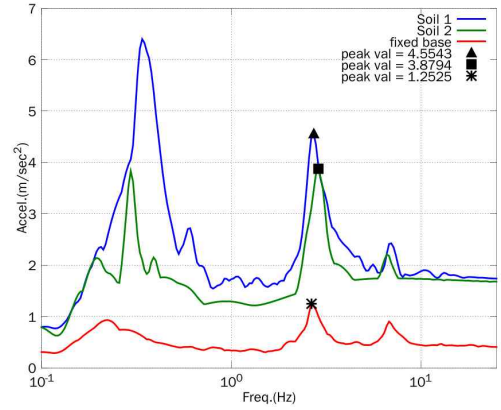


Fig. 10. Nacell Response Spectrum as Bucket Stiffness

5. 결 론

본 논문에서는 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 지진해석을 지반-구조물 상호작용해석을 고려하여 수행하고 버켓기초의 매개변수의 변화에 따른 응답을 기초부와 나셀부에서 비교분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) H/R비가 0.25에서 1.50까지 증가할 수록 기초부에서는 전반적인 응답의 감소로 나타났으나 상부에서는 높은 진동수에 해당하는 첨두값을 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나 기초부응답에서는 특수한 진동수에서의 증폭되는 현상도 관찰되었다.

(2) 버켓의 강도에 대한 영향은 기초부에서는 3Hz이상의 응답에 대해서 감소가 일어났다. 나셀부의 경우 구조물의 진동특성을 반영하여 두 번째 첨두에서 감소가 나타났다. 그러나 버켓의 강도가 일정값에 도달한 이후에는 이러한 영향은 무시할 정도이다.

(3) 지반의 강도에 따른 영향은 기초부에서 특수한 진동수에서 응답이 증폭이 관찰되었고 상부에서의 응답은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다.

(4) 이러한 모든 해석경우에 있어서 암반으로 가정한 응답에 비하여 월등히 큰 응답 값을 보여 지반-구조물상호작용의 고려가 버켓기초를 가진 해상풍력타워의 지진거동에 큰 영향을 미친다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2010 건설기술혁신사업(과제번호: 10기술혁신E04)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

Chen, C.H., Penzien, J.(1986), “Dynamic modeling of axisymmetric foundation,” Earthquake Engineering and Structure Dynamics, Vol. 14, pp. 823-840

Doherty, J. P. and A. J. Deeks(2003), "Elastic response of circular footings embedded in a non-homogeneous half-space", Geotechnique, Vol. 53, No. 8, pp. 703-714.

Erica Bush and Lance Manuel(2009), "Foundation Models for Offshore Wind Turbines", 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 5 - 8 January 2009, Orlando, Florida

Guangling He, Jie Li(2008) ,"Seismic Analysis of Wind Turbine System Including Soil-structure Interaction" The 14th World Conference on Earthquake Engineering

Gyehee Lee(2010), "Dynamic Stiffness of the Scaled Boundary Finite Element Method Non-Homogeneous Elastic Space" Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 23, No. 12, pp. 165-173. (in Korean)

Korea Power Engineering Company(1999), A Study for the Soil-Structure Interaction Analysis through the Participation of LSST(Large Scale Seismic Test) Project in Hualien, Taiwan. (in Korean)

Luco, J.E.(1974), “Impedance functions for a rigid foundation on a layered medium,” Nuclear Engineering & Design, Vol. 31, pp. 204-217

Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi, M., Tajirian, F., Vahdani, S., and Ostadan, F.(1988), SASSI: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction, User’s Manual, University of California, Berkeley

Medina, F., Penzien, J.(1982), “Infinite elements for elasto-dynamics,” Earthquake Engineering and Structure Dynamics, Vol. 10, pp. 699-709

Morten Liingaard(2006), "Dynamic Behaviour of Suction Caissons", PhD thesis, Alborg university

Namsik Kim. Jaemin Kim, Gyehee Lee(2004), Generation of artificial earthquake time histories for the seismic analysis of base-isolated bridges, Institute of Production Technology, National Pusan University.(in Korean)

Simula (2010), ABAQUS 6.10 User Manual

Tassoulas, J.L.(1983), “Elements for the numerical analysis of wave motion in layered media,” International Journal for Numerical Method in Engineering, Vol. 19, pp. 1005-1032.

University of California at Berkley(1999), SASSI 2000 User Manual Rev. 1

White, W., Valliappan, S., and Lee, I.K.(1969), “Unified boundary for finite dynamic model,” Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, Vol. 103, , pp. 160-174.

Wolf, J. P(1997), "Spring-dashpot-mass models for foundation vibrations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No. 9, pp. 931-949.

Wolf, J. P. and Deeks, A. J.(2004), "Foundation Vibration Analysis: A Strength-of-Materials Approach", Elsevier

Yun, C.B., Yang, S.C., Kim, J.M., Kim, D.K., Choi, J.S., Chang, S.H., and Seo, C.G.(2007), User’s manual of KIESSI program for 2D, AXI and 3D fluid-soil-structure interaction system, Dynamic structural Lab., KAIST