

지반-구조물 상호작용을 고려한 콘크리트 석션식 해상풍력 지지구조물의 지진거동 특성

이진호^{1*} · 진병무² · 배경태²

¹부경대학교 해양공학과, ²대우건설 기술연구원

Seismic Behaviors of Concrete-Suction-Type Offshore Wind Turbine Supporting Structures Considering Soil-Structure Interaction

Jin Ho Lee^{1*}, Byeong-Moo Jin² and Kyung-Tae Bae²

¹Department of Ocean Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

²Daewoo Institute of Construction Technology, DAEWOO E&C, Suwon, 16297, Korea

Abstract

In this study, characteristics of seismic behaviors of offshore wind turbine systems using concrete-suction-type supporting structures are investigated. Applying hydrodynamic pressure from the surrounding sea water and interaction forces from the underlying soil to the structural system which is composed of RNA, the tower, and the supporting structure, a governing equation of the system is derived and its earthquake responses are obtained. It can be observed from the analysis results that the responses are significantly influenced by soil-structure interaction because dynamic responses for higher natural vibration modes are increased due to the flexibility of soil. Therefore, the soil-structure interaction must be taken into consideration for accurate assessment of dynamic behaviors of offshore wind turbine systems using concrete-suction-type supporting structures.

Keywords : offshore wind turbine, concrete-suction-type supporting structure, earthquake response, soil-structure interaction

1. 서론

최근 전 세계적으로 지구 온난화를 방지하고 기후변화에 대응하기 위하여 탄소배출에 대한 국제 환경 규제가 심화되고 있는 가운데, 화석연료 고갈에 대비하기 위해 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 신재생 에너지 개발이 활발해지고 있다. 신재생 에너지 개발을 위해 태양열발전, 풍력발전, 조류발전, 파력발전 등과 같은 다양한 친환경 에너지가 관심을 받고 있는데, 그 중에서도 풍력발전은 최근 상용화가 이루어져 전 세계적으로 많은 풍력발전 단지가 건설되었고 또 건설 중에 있다(Spera, 2009).

풍력발전은 지금까지는 육상풍력발전을 위주로 진행되어 왔지만, 해상풍력발전의 보급 용량은 전 세계적으로 빠른 속도로 증대되고 있다. 해상풍력발전은 육상풍력발전에 비하여 용지

확보가 용이하고 지속적으로 강한 바람을 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 그 건설비용이 고가이므로 구조물 거동의 정확한 예측을 통해 비용 효율적으로 발전시설을 건설하여야 한다.

한편, 지진에 의한 구조물의 손상이나 붕괴는 인명과 재산에 많은 피해를 줄 수 있기 때문에, 전 세계적으로 지진에 대한 연구가 활발히 진행되어 그 피해와 파급효과를 감소시키고 있다. 지진에 의해 피해는 해상풍력발전 시스템에 대해서도 예외가 아니다. 특히, 지진으로 인한 해상풍력발전 시스템의 피해는 에너지 공급에도 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 해상풍력발전 시스템은 지진에 대해서 일반 구조물보다는 한층 높은 수준의 안전성을 보장할 수 있도록 설계되고 유지되어야 할 필요가 있고, 이에 대한 다양한 연구가 진행되었다(Choi *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012; 2013).

* Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6591; E-mail: jhlee0218@pknu.ac.kr

Received June 22 2017; Revised July 24 2017;

Accepted July 25 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해상풍력발전 시스템은 건설되는 수심에 따라 다양한 형식의 지지구조를 사용하는데, 최근 발전 용량이 증가하면서 대형화된 RNA(rotor-nacelle assembly)와 타워를 지지할 수 있고 더욱 깊은 수심에 건설할 수 있는 새로운 형식의 지지구조 개발에 대한 연구가 이루어지고 있다. 특히, 육상보다는 가혹한 해상의 환경 조건 하에서 유지보수비용을 줄이기 위해 콘크리트 재료를 사용한 새로운 형식의 지지구조물에 대한 연구가 국내외에서 진행되고 있다.

본 연구에서는 기존의 지지구조에 비하여 더 깊은 수심에 건설이 가능하고 5MW급 발전기를 지지할 수 있는 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 해상풍력발전시스템의 지진응답 해석을 통해 그 거동 특성을 평가하고자 한다. 본 연구에서 고려한 콘크리트 석션식 지지구조물은 Fig. 1에 보인 것과 같이 콘크리트 중력식 기초와 석션 기초가 결합된 형태이다. 이러한 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 해상풍력발전 시스템의 지진응답 해석을 위해 이 시스템의 운동방정식을 도출한다. 전체 시스템을 RNA(rotor-nacelle assembly), 타워, 지지구조를 포함한 구조계, 유체, 지반의 부분구조로 분리하고, 유한요소 기법을 사용하여 구조계의 운동방정식을 도출한다. 구조계에 작용하는 해수의 동수압을 산정하고 이로부터 유체로 인한 부가질량과 부가하중을 결정한다. 또한, 지반의 임피던스와 기초입력운동으로부터 지반과의 상호작용력을 산정한다. 이상으로부터 구조계, 유체, 지반으로 이루어진 해상풍력발전시스템의 운동방정식을 도출하고 지진응답 해석을 수행할 수 있다. 개발된 해석기법을 이용하여 5MW급 해상풍력발전시스템의 지진응답해석을 수행하고 그 거동 특성을 파악하고자 한다.

2. 지배방정식 유도

여기에서는 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 해상풍력발전시스템의 운동방정식을 유도하고자 한다. Fig. 1에 보인 바와 같이 고려하는 시스템은 RNA, 타워, 지지구조물을 포함한 구조계, 해수, 지반으로 이루어져 있다. 해수는 구조계에 동수압력을 작용하고, 구조계와 지반 간에는 상호작용력이 존재한다. 그러므로 구조계의 운동방정식에 해수의 동수압력과 지반에 의한 상호작용력을 외력으로 가하여 전체 시스템의 지배방정식을 유도하고자 한다.

본 연구에서 타워는 원형 단면을 가지고 있고 RNA는 타워 상단의 집중질량으로 근사할 수 있다고 가정한다. RNA와 타워를 지지하는 지지구조물도 축대칭 구조물이므로, 이 시스템의 운동방정식을 원통형 좌표계에서 서술할 것이다. 원통형 좌표계에서 모든 물리량은 원주 방향으로 $\theta=0$ 인 평면에 대하여 대칭인 성분, 즉, 원주 방향으로 $\cos(n\theta)$ ($n=0,1,2,\dots$)로

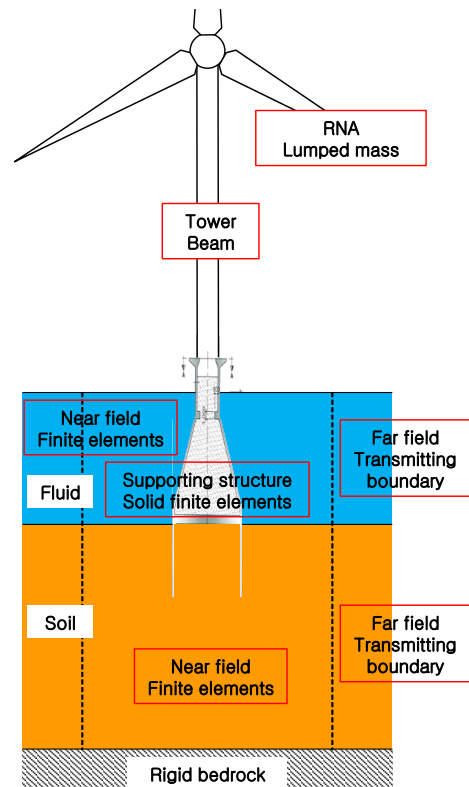


Fig. 1 Offshore wind turbine system using concrete-suction supporting structure

변동하는 성분과 역대칭인 $\sin(n\theta)$ ($n=1,2,\dots$)로 변동하는 성분의 조합으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 해저지진의 입사파 중 수직으로 입사하는 1축 수평지반운동의 영향만 고려할 것이므로, $n=1$ 인 성분만 고려할 것이다. 일반적인 3차원 시스템에 대한 적용은 그 이외의 성분들까지도 모두 조합하면 가능하다.

Fig. 1의 해상풍력발전시스템의 구조계에 일반적인 유한요소기법을 적용하여 식 (1)과 같이 운동방정식을 진동수영역에서 구성할 수 있다.

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sw} & \mathbf{M}_{sg} \\ \mathbf{M}_{ws} & \mathbf{M}_{ww} & \mathbf{M}_{wg} \\ \mathbf{M}_{gs} & \mathbf{M}_{gw} & \mathbf{M}_{gg} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sw} & \mathbf{C}_{sg} \\ \mathbf{C}_{ws} & \mathbf{C}_{ww} & \mathbf{C}_{wg} \\ \mathbf{C}_{gs} & \mathbf{C}_{gw} & \mathbf{C}_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sw} & \mathbf{K}_{sg} \\ \mathbf{K}_{ws} & \mathbf{K}_{ww} & \mathbf{K}_{wg} \\ \mathbf{K}_{gs} & \mathbf{K}_{gw} & \mathbf{K}_{gg} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_w \\ \mathbf{u}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_w^{hyd} \\ \mathbf{f}_g^s \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 아래첨자 w 는 구조계의 절점 중 유체와 접하고 있는 부분에 위치한 절점, 아래첨자 g 는 구조계의 절점 중 지반과 접하고 있는 부분에 위치한 절점, 아래첨자 s 는 나머지 구조계의 절점을 의미한다. \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 각각 구조계의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 의미하고, $\mathbf{u}(w)$ 는 구조계의 변위를 나타낸다. $\mathbf{f}^{hyd}(w)$ 는 구조계에 작용하는 유체의 동수압력, $\mathbf{f}^s(w)$ 는 구조

계에 작용하는 지반에 의한 상호작용력을 의미한다. ω 는 가진 진동수(exciting frequency)를 의미한다.

구조계에 작용하는 유체의 동수압력을 산정한다. 해수는 비점성 압축성 이상 유체로 가정하고, 유연한 해저지반에 의한 에너지 흡수와 반무한 영역으로의 에너지 방사를 고려하여 동수압력을 산정한다. 단, 유체의 자유표면에서의 표면파의 영향은 고려하지 않는다. 구조물과 접하고 임의의 기하학적 형상을 가질 수 있는 유체의 근역은 유한요소로 모사하고, 그 깊이가 일정하고 반경 방향으로 무한한 유체의 원역은 전달 경계를 사용하여 그 영향을 모사한다. 이와 같이 구성된 수치 모형으로부터 구조계에 가해져야 할 동수압을 식 (2)와 같이 산정할 수 있다(Lee *et al.*, 2015).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ww} & \mathbf{R}_{wn} & \mathbf{R}_{wg} & \mathbf{R}_{wf} \\ \mathbf{R}_{nw} & \mathbf{R}_{nn} & \mathbf{R}_{ng} & \mathbf{R}_{nf} \\ \mathbf{R}_{gw} & \mathbf{R}_{gn} & \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{R}_{gf} \\ \mathbf{R}_{fw} & \mathbf{R}_{fn} & \mathbf{R}_{fg} & \mathbf{R}_{ff} + \mathbf{R}_{ff}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{p}_w \\ \mathbf{p}_n \\ \mathbf{p}_g \\ \mathbf{p}_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_w \\ \mathbf{0} \\ \pi\omega^2\rho_w \int_{\partial\Omega_g^r} \mathbf{N}^T \mathbf{u}_{gn} r dl \\ \mathbf{R}_{ff}^f \mathbf{p}_f^* - \mathbf{q}_f^* \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, \mathbf{R} 과 \mathbf{R}^f 는 각각 유체 근역과 원역의 시스템 행렬, \mathbf{p} 와 \mathbf{q} 는 각각 유체의 동수압과 이의 flux, ρ_w 는 유체의 밀도, \mathbf{N} 은 유체 근역의 형상 함수, \hat{n} 과 \mathbf{u}_{gn} 은 각각 유체 근역의 외향 법선 벡터와 그 방향으로의 지반운동, \mathbf{p}^* 와 \mathbf{q}^* 는 각각 유체 원역의 자유장 동수압과 이의 flux를 의미한다. 식 (2)에서 아래첨자 w 는 유체 근역의 절점 중 구조계와 접하는 부분에 위치한 절점, 아래첨자 g 는 유체 근역의 절점 중 지반과 접하는 부분인 $\partial\Omega_g^r$ 에 위치한 절점, 아래첨자 f 는 유체 근역의 절점 중 원역과 접하는 부분에 위치한 절점, 아래첨자 n 은 유체 근역의 나머지 절점을 의미한다. 식 (2)에서 유체 근역의 시스템 행렬 \mathbf{R} 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ww} & \mathbf{R}_{wn} & \mathbf{R}_{wg} & \mathbf{R}_{wf} \\ \mathbf{R}_{nw} & \mathbf{R}_{nn} & \mathbf{R}_{ng} & \mathbf{R}_{nf} \\ \mathbf{R}_{gw} & \mathbf{R}_{gn} & \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{R}_{gf} \\ \mathbf{R}_{fw} & \mathbf{R}_{fn} & \mathbf{R}_{fg} & \mathbf{R}_{ff} \end{bmatrix} = -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ww} & \mathbf{G}_{wn} & \mathbf{G}_{wg} & \mathbf{G}_{wf} \\ \mathbf{G}_{nw} & \mathbf{G}_{nn} & \mathbf{G}_{ng} & \mathbf{G}_{nf} \\ \mathbf{G}_{gw} & \mathbf{G}_{gn} & \mathbf{G}_{gg} & \mathbf{G}_{gf} \\ \mathbf{G}_{fw} & \mathbf{G}_{fn} & \mathbf{G}_{fg} & \mathbf{G}_{ff} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_{gg} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ww} & \mathbf{H}_{wn} & \mathbf{H}_{wg} & \mathbf{H}_{wf} \\ \mathbf{H}_{nw} & \mathbf{H}_{nn} & \mathbf{H}_{ng} & \mathbf{H}_{nf} \\ \mathbf{H}_{gw} & \mathbf{H}_{gn} & \mathbf{H}_{gg} & \mathbf{H}_{gf} \\ \mathbf{H}_{fw} & \mathbf{H}_{fn} & \mathbf{H}_{fg} & \mathbf{H}_{ff} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$\mathbf{G} = \frac{\pi}{C_w^2} \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} r dr dz \quad (3b)$$

$$\mathbf{C}_{gg} = \pi c \int_{\partial\Omega_g^r} \mathbf{N}^T \mathbf{N} r dl \quad (3c)$$

$$\mathbf{H} = \pi \int \mathbf{B}^T \mathbf{B} r dr dz \quad (3d)$$

$$c = \frac{1}{C_w} \frac{1-\alpha}{1+\alpha} = \frac{\rho_w}{\rho_b C_b} \quad (3e)$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{\partial \mathbf{N}}{\partial r} \quad \frac{n}{r} \mathbf{N} \quad \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial z} \right]^T \quad (3f)$$

여기서, C_w 는 유체의 압축과 속도, α 는 반사계수, ρ_b 와 C_b 는 각각 해저지반의 밀도와 압축과 속도이다. 식 (2)에서 유체 원역의 시스템 행렬 \mathbf{R}^f 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{R}^f = \pi R (\mathbf{C}^f)^T \mathbf{D}^f \mathbf{C}^f \quad (4)$$

여기서, 행렬 \mathbf{C}^f 와 모드 행렬 \mathbf{D}^f 는 Lee 등(2015)에 정의되어 있다. 식 (2)에서 \mathbf{p}_n , \mathbf{p}_g , \mathbf{p}_f 에 대하여 행렬 응축을 시행하면, 구조계에 가해져야 할 동수압 \mathbf{p}_w 에 관한 표현을 얻을 수 있고, 이로부터 동수압력 \mathbf{f}_w^{hyd} 를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{f}_w^{hyd} = -\mathbf{M}_{ww}^{add} \ddot{\mathbf{u}}_w + \tilde{\mathbf{f}}_w^{hyd} \quad (5a)$$

$$\mathbf{M}_{ww}^{add} = \rho_w \mathbf{T} \tilde{\mathbf{R}}_{ww}^{-1} \mathbf{T}^T \quad (5b)$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_w^{hyd} = -\mathbf{T} \tilde{\mathbf{p}}_w \quad (5c)$$

$$[\tilde{\mathbf{R}}_{ww}] = [\mathbf{R}_{ww}] - [\mathbf{R}_{wn} \mathbf{R}_{wg} \mathbf{R}_{wf}]$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{nn} & \mathbf{R}_{ng} & \mathbf{R}_{nf} \\ \mathbf{R}_{gn} & \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{R}_{gf} \\ \mathbf{R}_{fn} & \mathbf{R}_{fg} & \mathbf{R}_{ff} + \mathbf{R}_{ff}^f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{nw} \\ \mathbf{R}_{gw} \\ \mathbf{R}_{fw} \end{bmatrix} \quad (5d)$$

$$[\tilde{\mathbf{p}}_w] = -[\tilde{\mathbf{R}}_{ww}]^{-1} [\mathbf{R}_{wn} \mathbf{R}_{wg} \mathbf{R}_{wf}]$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{nn} & \mathbf{R}_{ng} & \mathbf{R}_{nf} \\ \mathbf{R}_{gn} & \mathbf{R}_{gg} & \mathbf{R}_{gf} \\ \mathbf{R}_{fn} & \mathbf{R}_{fg} & \mathbf{R}_{ff} + \mathbf{R}_{ff}^f \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \pi\omega^2\rho_w \int_{\partial\Omega_g^r} \mathbf{N}^T \mathbf{u}_{gn} r dl \\ \mathbf{R}_{ff}^f \mathbf{p}_f^* - \mathbf{q}_f^* \end{Bmatrix} \quad (5e)$$

여기서, \mathbf{T} 는 동수압을 구조계에 작용하는 동수압력으로 변환 해주는 변환 행렬이다. 식 (5)에서 확인할 수 있듯이 해수에 의해 구조계에 작용하는 동수압력은 가진진동수에 좌우되는 부가질량 $\mathbf{M}_{ww}^{add}(\omega)$ 와 부가하중 $\tilde{\mathbf{f}}_w^{hyd}(\omega)$ 에 의해 표현된다.

구조계에 작용하는 지반에 의한 상호작용력을 산정한다. 지반의 일정 깊이부터는 강체 기반암이 존재한다고 가정하고, 불규칙하고 비균질의 지반 근역은 유한요소로, 깊이가 일정하고 균질인 지반 원역은 반경 방향으로 무한한 영역으로의 에너지 방사를 고려할 수 있는 전달경계를 사용하여 모사한다. 이와 같이 구성된 수치 모형으로부터 지반의 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다(Kausel, 1974).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{gg} & \mathbf{S}_{gn} & \mathbf{S}_{gf} \\ \mathbf{S}_{ng} & \mathbf{S}_{nn} & \mathbf{S}_{nf} \\ \mathbf{S}_{fg} & \mathbf{S}_{fn} & \mathbf{S}_{ff} + \mathbf{S}_{ff}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_g \\ \mathbf{u}_n \\ \mathbf{u}_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_g^g \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{ff}^f \mathbf{u}_f^* - \mathbf{f}_f^* \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{S} 와 \mathbf{S}^f 는 각각 지반 근역과 원역의 시스템 행렬, \mathbf{u} 는

지반의 변위, \mathbf{f}^g 는 지반에 작용하는 구조계에 의한 상호작용력, \mathbf{u}^* 와 \mathbf{f}^* 는 각각 지반 원역의 자유장 응답을 의미한다. 식 (6)에서 아래첨자 g 는 지반 근역의 절점 중 구조계와 접하는 부분에 위치한 절점, 아래첨자 f 는 지반 근역의 절점 중 원역과 접하는 부분에 위치한 절점, 아래첨자 n 은 지반 근역의 나머지 절점을 의미한다. 식 (6)에서 지반 근역의 시스템 행렬 \mathbf{S} 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{gg} & \mathbf{S}_{gn} & \mathbf{S}_{gf} \\ \mathbf{S}_{ng} & \mathbf{S}_{nn} & \mathbf{S}_{nf} \\ \mathbf{S}_{fg} & \mathbf{S}_{fn} & \mathbf{S}_{ff} \end{bmatrix} = -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{gg} & \mathbf{M}_{gn} & \mathbf{M}_{gf} \\ \mathbf{M}_{ng} & \mathbf{M}_{nn} & \mathbf{M}_{nf} \\ \mathbf{M}_{fg} & \mathbf{M}_{fn} & \mathbf{M}_{ff} \end{bmatrix} + (1+2i\xi) \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{gg} & \mathbf{K}_{gn} & \mathbf{K}_{gf} \\ \mathbf{K}_{ng} & \mathbf{K}_{nn} & \mathbf{K}_{nf} \\ \mathbf{K}_{fg} & \mathbf{K}_{fn} & \mathbf{K}_{ff} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 행렬 \mathbf{M} , \mathbf{K} 는 각각 지반 근역의 질량, 강성 행렬이고, ξ 는 지반의 이력감쇠비이다. 식 (6)에서 유체 원역의 시스템 행렬 \mathbf{S}^f 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{S}^f = R_b \left[\mathbf{A}^f \boldsymbol{\Psi}^f (\mathbf{K}^f)^2 + (\mathbf{D}^f - \mathbf{E}^f + \mathbf{N}^f) \boldsymbol{\Phi}^f \mathbf{K}^f - (\mathbf{L}^f + \mathbf{Q}^f) \boldsymbol{\Psi}^f \right] (\mathbf{Y}^f)^{-1} \quad (8)$$

여기서, 층상 지반의 강성 행렬 \mathbf{A}^f , \mathbf{D}^f , \mathbf{E}^f , \mathbf{N}^f , \mathbf{L}^f , \mathbf{Q}^f 와 모드 행렬 $\mathbf{K}^f(\omega)$, $\boldsymbol{\Psi}^f(\omega)$, $\boldsymbol{\Phi}^f(\omega)$, $\mathbf{Y}^f(\omega)$ 는 Kausel(1974)에 정의되어 있다. 식 (6)에서 \mathbf{u}_n , \mathbf{u}_f 에 대하여 행렬 응축을 시행하면, 구조계에 작용하는 지반에 의한 상호작용력 \mathbf{f}^s 에 관한 표현을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{f}_g^s = -\mathbf{f}_g^g = -\mathbf{S}_{gg}^g (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_g^0) \quad (9a)$$

$$[\mathbf{S}_{gg}^g] = [\mathbf{S}_{gg}] - [\mathbf{S}_{gn} \ \mathbf{S}_{gf}] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{nn} & \mathbf{S}_{nf} \\ \mathbf{S}_{fn} & \mathbf{S}_{ff} + \mathbf{S}_{ff}^f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ng} \\ \mathbf{S}_{fg} \end{bmatrix} \quad (9b)$$

$$\{\mathbf{u}_g^0\} = -[\mathbf{S}_{gg}^g]^{-1} [\mathbf{S}_{gn} \ \mathbf{S}_{gf}] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{nn} & \mathbf{S}_{nf} \\ \mathbf{S}_{fn} & \mathbf{S}_{ff} + \mathbf{S}_{ff}^f \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{ff}^f \mathbf{u}_f^* - \mathbf{f}_f^* \end{bmatrix} \right\} \quad (9c)$$

여기서, \mathbf{S}_{gg}^g 는 지반의 동적 강성을 의미하고, \mathbf{u}_g^0 는 구조계에 가해져야 할 입력 지반 운동이다.

식 (5)와 식 (9)로부터 얻어진 유체의 동수압력 \mathbf{f}^{hyd} 와 지반에 의한 상호작용력 \mathbf{f}^s 을 식 (1)의 구조계의 운동방정식에 대입하면, 해상풍력발전시스템의 최종 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sw} & \mathbf{M}_{sg} \\ \mathbf{M}_{ws} & \mathbf{M}_{ww} + \mathbf{M}_{ww}^{add} & \mathbf{M}_{wg} \\ \mathbf{M}_{gs} & \mathbf{M}_{gw} & \mathbf{M}_{gg} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sw} & \mathbf{C}_{sg} \\ \mathbf{C}_{ws} & \mathbf{C}_{ww} & \mathbf{C}_{wg} \\ \mathbf{C}_{gs} & \mathbf{C}_{gw} & \mathbf{C}_{gg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sw} & \mathbf{K}_{sg} \\ \mathbf{K}_{ws} & \mathbf{K}_{ww} & \mathbf{K}_{wg} \\ \mathbf{K}_{gs} & \mathbf{K}_{gw} & \mathbf{K}_{gg} + \mathbf{S}_{gg}^g \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_w \\ \mathbf{u}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_w^{hyd} \\ \mathbf{S}_{gg}^g \mathbf{u}_g^0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 수직으로 입사하는 수평지반운동에 대한 해상풍력발전시스템의 지진거동을 계산할 수 있다.

3. 적용 및 지진거동 특성 분석

2장에서 설명한 해석기법을 이용하여 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 5MW급 해상풍력발전시스템의 지진응답 해석을 수행하고 그 거동 특성을 파악한다.

타워의 위치에 따른 직경과 두께는 Table 1과 같고, 타워 강재의 탄성계수와 밀도는 각각 210GPa와 7,850kg/m³이다.

Table 1 Properties of the tower

Node	Height (m)	Diameter (m)	Thickness (mm)	Lumped mass(kg)
1	0.000	5.460	48	3500.0
2	0.140	5.460	48	7.0
3	2.508	5.421	48	118.4
4	4.877	5.381	38	118.5
5	7.247	5.342	37	118.5
6	9.617	5.303	37	118.5
7	11.988	5.263	36	118.6
8	14.361	5.224	36	118.7
9	16.734	5.185	35	118.7
10	19.107	5.145	35	118.7
11	21.482	5.106	34	118.8
12	23.857	5.066	33	118.8
13	26.233	5.027	33	118.8
14	28.610	4.987	32	118.9
15	30.988	4.948	32	118.9
16	31.093	4.948	32	3505.3
17	31.198	4.948	32	5.3
18	33.577	4.909	31	119.0
19	35.956	4.869	31	119.0
20	38.337	4.830	30	119.1
21	40.718	4.791	29	119.1
22	43.100	4.751	29	119.1
23	45.483	4.712	28	119.2
24	47.866	4.673	27	119.2
25	50.250	4.633	27	119.2
26	52.636	4.594	26	119.3
27	50.022	4.554	25	119.3
28	57.408	4.515	24	119.3
29	59.796	4.475	24	119.4
30	62.184	4.436	23	119.4
31	64.574	4.396	22	119.5
32	66.964	4.357	21	119.5
33	69.355	4.317	20	119.6
34	71.746	4.278	19	119.6
35	74.139	4.238	18	119.7
36	76.532	4.199	26	119.7
37	78.144	4.199	26	80.6
38	78.188	4.170	26	2.2
39	78.304	4.170	26	3235.8

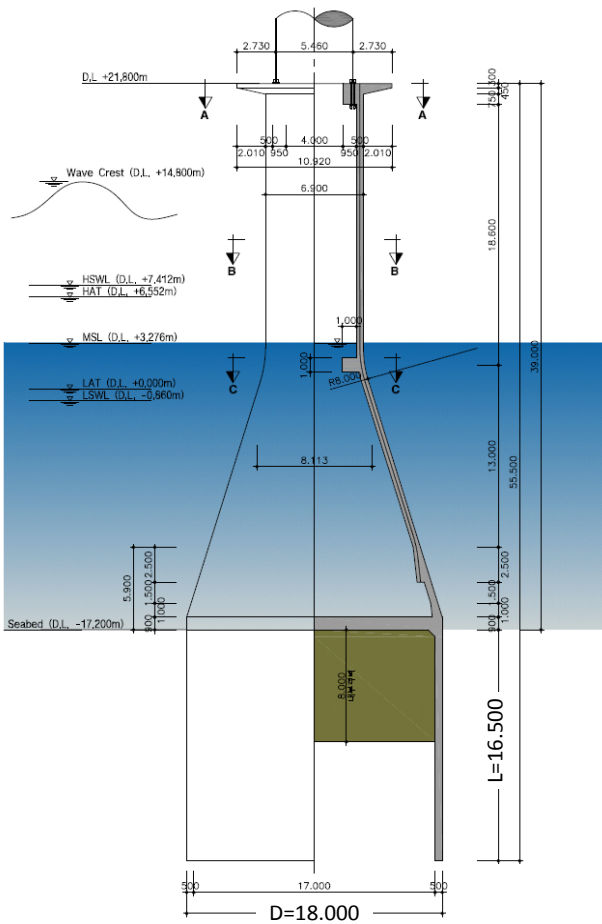


Fig. 2 Concrete-suction supporting structure

Table 2 Properties of the soil layers

Layer	Silty sand	Coarse sand	Sandy gravel
Thickness(m)	0~22	22~34	34~55
Submerged unit weight (kN/m ³)	9	9	11
Max. S-wave velocity(m/s)	201	267	665.78
Equivalent S-wave velocity(m/s)	163.23	217.33	665.78
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.35

한편, 타워에 설치되는 중간설비와 고장력 볼트 등으로 인해 추가 질량이 발생하게 되는데, 이로 인한 타워 각 부분의 집중 질량이 Table 1에 정리되어 있다. 이상과 같은 단면과 재료 성질을 가지는 타워는 보요소를 사용하여 수치 모형을 구성한다. 한편, RNA의 영향은 상단에 집중되어 있는 강체로 모사하는데, 이 강체의 질량과 회전관성은 각각 428,000kg과 19,866,582 kg·m²이다. 타워의 상부에 위치한 회전날개는 언제나 회전하는 것이 아니라, 풍속이 기동풍속(cut-in speed) 이상이고 정지 풍속(cut-out speed) 이하일 때만 회전한다. 각각의 경우에 풍력발전기의 로터(rotor)는 고유한 진동수로 회전하므로, 결국 회전날개의 회전은 타워에 특정 주파수 범위의 조화하중을 가하게 된다. 이를 풍력발전기의 1P 진동수라고 한다. 또한, 로터가 1회전할 때 회전날개의 수에 따라 1P 진동수의 정수배에 해당하는 진동수의 조화하중이 추가적으로 가해지게 된다. 이를 풍력발전기의 3P 진동수라고 한다. 예제 풍력발전기의 1P 진동수 범위는 0.120~0.229Hz이고 3P 진동수 범위는 0.360~0.688Hz이다.

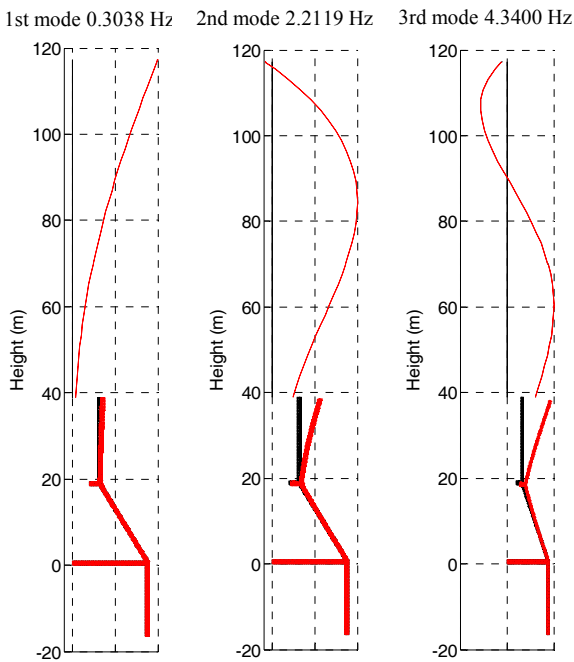


Fig. 3 Natural vibration modes of the structural system: not considering soil-structure interaction

신형식 콘크리트 지지구조물의 제원은 Fig. 2와 같고, 이를 구성하는 콘크리트의 탄성계수는 32.21GPa, 포아송비는 0.167, 밀도는 2,548kg/m³이다. 이상과 같은 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 해상풍력발전시스템의 고유모드는 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않을 때 Fig. 3과 같다.

해수의 깊이는 평균해수면 20.476m이고, 해수의 압축과 속도와 밀도는 각각 1,439m/s와 1,031kg/m³이다. 해저 지반의 심도와 재료 성질은 Table 2와 같다. 해저 지반의 재료 성질로부터 식 (3e)의 반사계수 α 는 -0.653으로 계산된다.

입력지반운동으로는 Fig. 4의 El Centro 지반 운동을 자유장 지반의 지표면 운동으로 사용한다.

예제 해상풍력발전시스템의 지진응답 해석을 수행하였다. 해석 수행 시 지지구조물 석션기초부의 스커트 길이/직경비 L/D를 0(스커트가 없이 중력식 기초부만 존재하는 경우), 0.25, 0.5, 0.75, 0.917(Fig. 2)로 변화시켜 가며 그 영향을 조사하였다. Fig. 5(a)는 타워 최상단에서의 상대 수평변위의

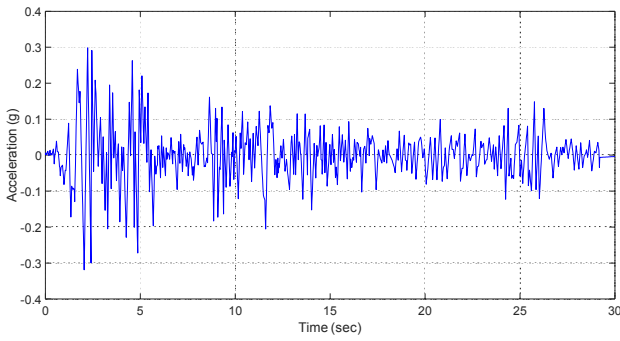
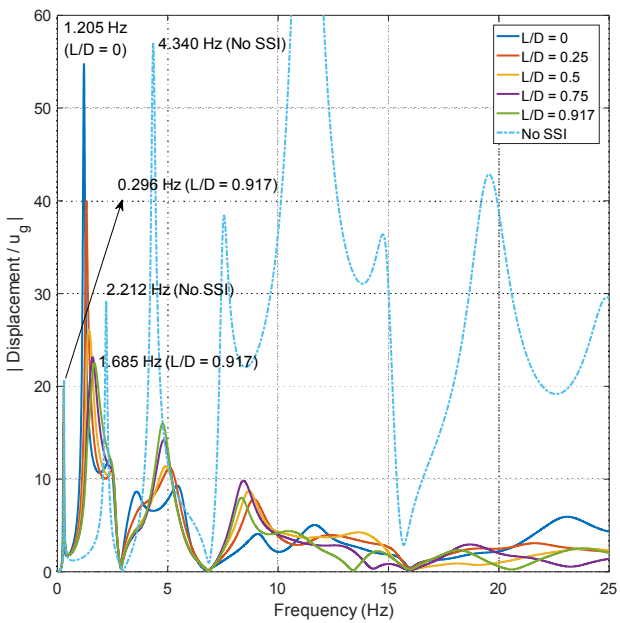
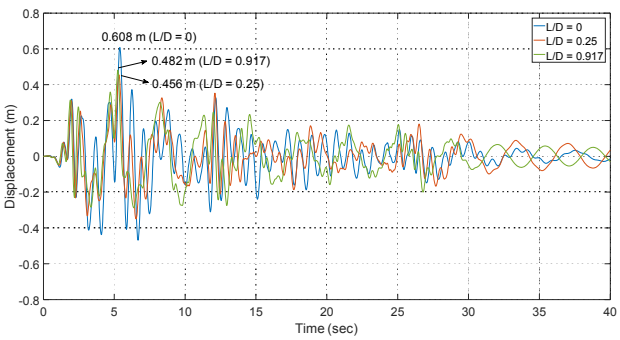


Fig. 4 Acceleration time history \ddot{u}_g of the input ground motion



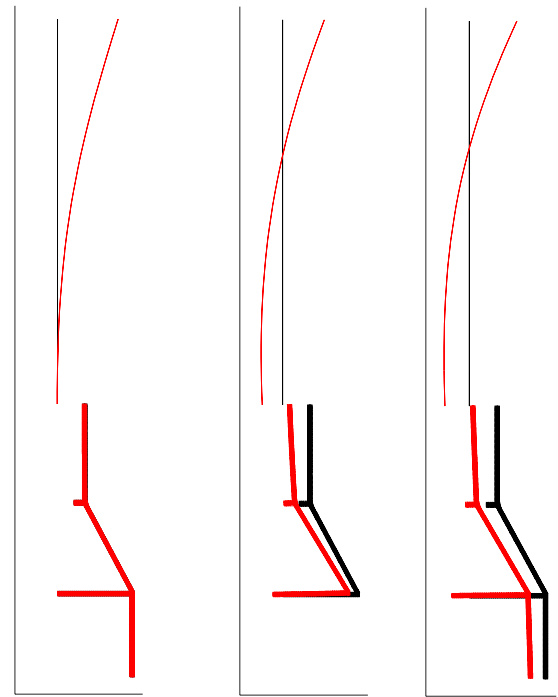
(a) Transfer function



(b) Time history

Fig. 5 Horizontal displacement at the top of tower

전달함수의 크기인데, 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우(no SSI)의 전달함수도 함께 도시하였다. Fig. 3에 보인 바와 같이 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않을 때의 1차와 2차 고유진동수는 각각 0.304Hz와 2.212Hz인데, 이 고유진동수를 Fig. 5(a)에서 명확히 관찰할 수 있다. 한편, 지반-



(a) Not considering SSI (b) L/D=0 (c) L/D=0.917

Fig. 6 Deformation of the tower and supporting structure

구조물 상호작용을 고려할 경우, 2차 고유진동모드가 1.205Hz ~ 1.685Hz 사이에 존재하는 것을 Fig. 5(a)의 전달함수에서 확인할 수 있다. 이 첨두부들은 해저 지반의 고유 모드와 밀접하게 연관되어 있다. Table 2의 해저 지반의 재료 성질로부터 지반의 평균 등가 전단파속도는 248.27m/s이고, 이에 해당하는 지반의 등가 고유진동수는 1.128Hz임을 계산할 수 있다 (EESK *et al.*, 1997). 즉, 유연한 해저 지반에 의한 동적 응답 증폭이 Fig. 5(a)의 1.205Hz~1.685Hz에서 발생하는 첨두부와 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다. 한편, 0.296Hz (L/D=0.917)의 첨두부는 1P 진동수 영역(0.120~0.229 Hz) 및 3P 진동수 영역(0.360~0.688Hz)과 잘 분리되어 있어, 이 시스템이 회전날개의 회전 진동에 대하여 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 타워 상단에서의 상대 수평변위의 시간이력을 보여주고 있다. 본 논문에는 포함하지 않았지만 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않을 때의 최대 변위 0.352m와 비교하여, 지반-구조물 상호작용은 대상 시스템의 응답을 크게 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 5(a)의 전달함수에서도 관찰할 수 있듯이, 대상 시스템의 변위 응답은 지지구조물의 구조적인 특성에 따라 상당한 변동을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 최대 상대 수평변위가 발생할 때의 변형 형상이다. Fig. 3의 고유모드와 비교했을 때, 지반-구조물 상호작용을 고려하면 1차 고유모드보다는 2차 고유모드와 유사한 모드의

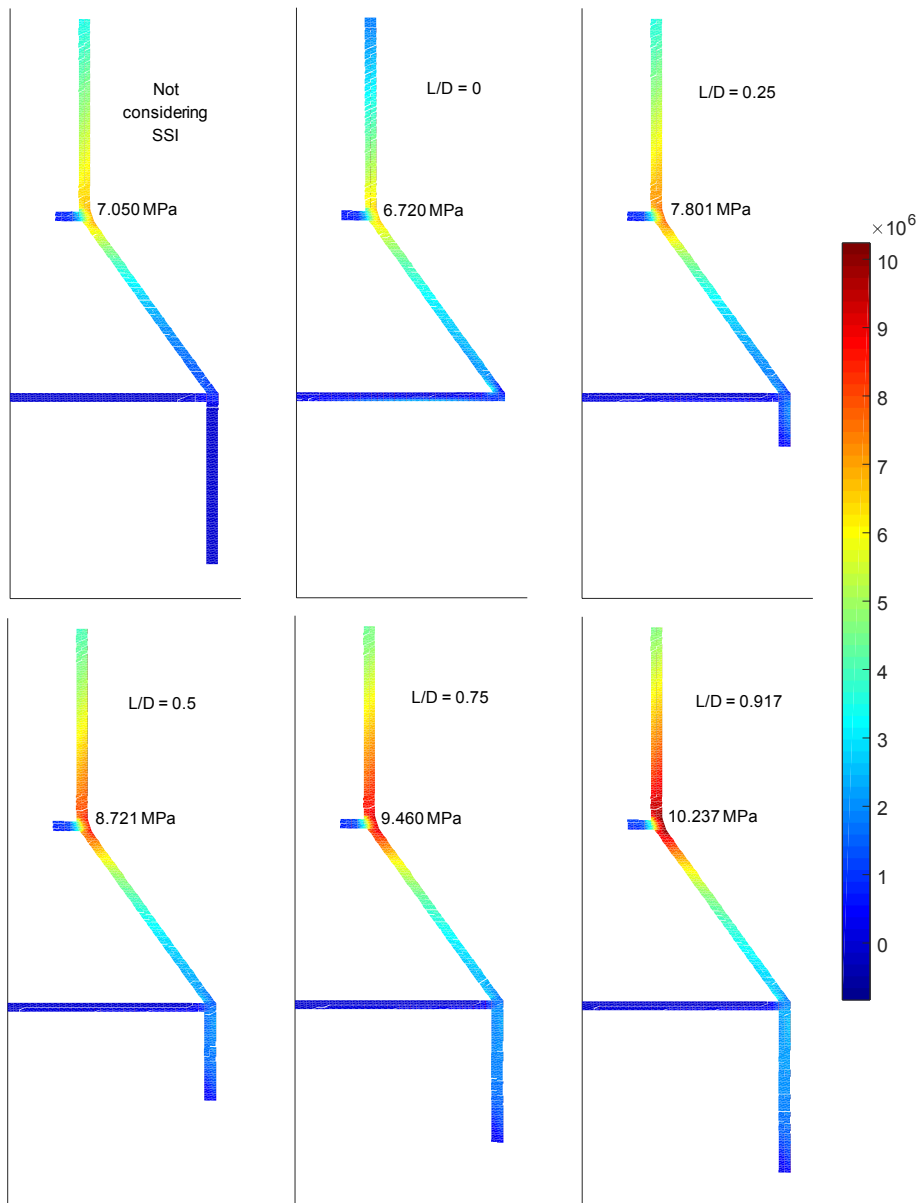


Fig. 7 Maximum principal stress in the supporting structure

응답이 우세함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5(a)의 1.205Hz ~ 1.685Hz 사이에서 발생하는 동적 응답 증폭이 Fig. 3의 2차 고유모드와 근접하기 때문에 발생한 현상이다.

이상에 보인 바와 같이 해상풍력발전시스템과 같이 아주 유연한 구조 시스템의 경우에도 지반-구조물 상호작용은 그 동적 응답을 크게 증가시킬 수 있다. 이는 지반-구조물 상호작용으로 인해 1차 고유모드가 아닌 고차 고유모드의 동적 응답이 증가할 수 있기 때문이다. Fig. 5에 보인 바와 같이 해석 대상 시스템의 1차 고유진동수는 $L/D=0.917$ 일 때 0.296Hz이다. 하지만, 유연한 지반에서의 응답 증폭으로 인해 1.205Hz ~ 1.685Hz 구간에서 동적 응답의 증폭이 발생하고, 이는 결국 시스템의 지진응답에 많은 영향을 미치게 된다. 이상으로부터

지반-구조물 상호작용은 유연한 지반에 놓인 강성과 질량이 큰 구조물뿐만 아니라 해상풍력발전시스템과 같이 아주 유연한 구조물에 대해서도 반드시 고려하여야 하는 사항인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 콘크리트 석션식 지지구조물에서 최대 주응력이 발생할 때의 주응력 분포이다. 콘크리트 석션식 지지구조물의 단면이 변하는 부분에 응력 집중이 발생하고, 지반-구조물 상호작용으로 인해 그 응답이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 석션기초부의 스커트 길이가 증가하여 지지구조물의 정착 효과가 증가할수록 응력 집중 현상은 심화됨을 관찰할 수 있다. 이러한 응력 집중으로 인해 콘크리트 지지구조물에 균열이 발생하지 않도록 지지구조물에는 긴장력이 가해지게 된다. 본

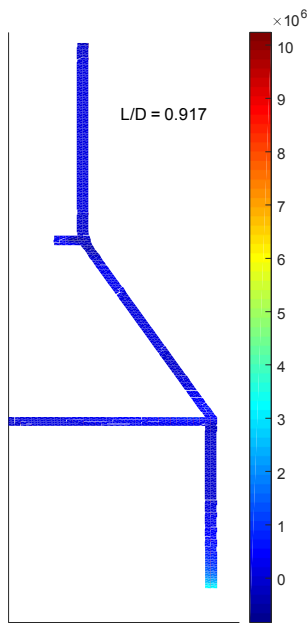


Fig. 8 Maximum principal stress in the supporting structure including the static effects

예제 구조물에서는 PS 강연선을 총 40개소에 설치하여 긴장력을 가하는데, 1개소는 단면적 138.7mm^2 의 PS 강연선 18가닥으로 이루어져 있다. PS 강연선의 기준인장강도는 1,900 MPa, 긴장율은 0.72, 강선유효율은 0.80이다. 결국 지지구조물에는 총 109,291kN의 긴장력이 가해지게 된다. 지진하중으로 인한 동적 응답에 긴장력 및 구조계의 자중으로 인한 정적 응답을 합산하여 전체 응답을 얻을 수 있다. Fig. 8은 이와 같이 계산하여 얻은 지지구조물의 주응력 분포인데, 구조물의 단면이 변하는 부분에서의 응력 집중이 해소되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 해상풍력발전시스템의 지진응답 해석을 수행하여 그 거동 특성을 평가하였다. 전체 시스템을 RNA, 타워, 지지구조물로 구성된 구조계와 이에 접하고 있는 유체 및 지반의 부분구조로 분리하여 운동방정식을 유도하였다. 구조계에 작용하는 유체의 동수압과 지반의 상호작용력을 산정하고, 이를 구조계의 운동방정식과 결합하여 전체 시스템의 지배방정식을 도출한 후, 이 방정식의 해를 구하여 해상풍력발전시스템의 지진응답을 계산하였다.

해석 결과로부터 지반-구조물 상호작용은 콘크리트 석션식 지지구조물에 의해 지지된 해상풍력발전시스템의 지진응답을 크게 증가시킬 수 있음을 확인하였고, 이와 같은 응답의 증가가

발생하는 원인을 규명하였다. 지반의 유연성으로 인해 시스템의 고차 고유모드 응답이 증가할 수 있고, 결과적으로 시스템의 지진응답이 크게 증가하게 됨을 해석 결과로부터 관찰할 수 있었다. 일반적으로 해상풍력발전 지지구조물에 설치되는 상부구조물은 아주 유연하여 그 고유주기가 아주 길지만, 이러한 유연한 구조물의 지진응답도 지반-구조물 상호작용에 의해서 크게 증가할 수 있으므로 해상풍력발전시스템의 동적 거동 산정 시에는 반드시 지반-구조물 상호작용의 효과를 고려하여야 할 것이다.

본 연구에서는 하나의 예제 해상풍력발전시스템의 지진거동 특성을 분석하였지만, 이 연구에서 사용한 해석기법을 활용하여 다양한 지반조건, 입력지진, 구조상세 등에 따른 영향을 분석할 수 있을 것이고 이로부터 보다 일반화된 결론을 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 산하 해양과학기술진흥원의 첨단항만 건설 기술개발사업의 연구비 지원(과제명 : 해상풍력 지지구조 설계기준 및 콘크리트 지지구조물 기술개발/20120093)을 받아 수행되었습니다.

References

- Choi, H.-C., Kim, D.-H., Kim, D.-M., Park, K.-K. (2010) Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23(2), pp.209~215.
- EESK, KICT (1997) *The Research of Seismic Design Code(II)*, Ministry of Construction and Transportation.
- Kausel, E. (1974) *Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media*, Research Report R74-11, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Lee, J.H., Bae, K.T., Jin, B.M., Kim, J.K. (2013) Earthquake Response Analysis of an Offshore Wind Turbine Considering Effects of Geometric Nonlinearity of a Structure and Drag Force of Sea Water, *EESK J. Earthq. Eng.*, 17, pp.257~269.
- Lee, J.H., Kim, J.K. (2015) Analysis of Three-dimensional Earthquake Responses of a Floating Offshore Structure with an Axisymmetric Floating

Structure, *EESK J. Earthq. Eng.*, 19, pp.145~159.
Lee, J.H., Lee, S., Kim, J.K. (2012) Earthquake Response Analysis of an Offshore Wind Turbine Considering Fluid-Structure-Soil Interaction, *EESK*

J. Earthq. Eng., 16, pp.1~12.
Spera, D.A. (2009) *Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, 2nd Edition, ASME Press, Three Park Avenue, New York.

요 지

본 연구에서는 콘크리트 석션식 지지구조물을 사용한 해상풍력발전시스템의 지진응답 해석을 수행하여 그 거동 특성을 파악한다. 전체 시스템을 RNA, 타워, 지지구조물로 구성된 구조계와 이에 접하고 있는 유체 및 지반의 부분구조로 분리하여 운동방정식을 유도한다. 구조계에 작용하는 유체의 동수압과 지반의 상호작용력을 산정하고, 이를 구조계의 운동방정식과 결합하여 전체 시스템의 지배방정식을 도출한 후, 이 방정식의 해를 구하여 해상풍력발전시스템의 지진응답을 계산한다. 해석 결과로부터 지반-구조물 상호작용은 콘크리트 석션식 지지구조물에 의해 지지된 해상풍력발전시스템의 지진응답을 크게 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 특히, 지반의 유연성으로 인해 시스템의 고차 고유모드 응답이 증가할 수 있으므로, 해상풍력발전시스템의 동적거동 산정 시에는 반드시 지반-구조물 상호작용의 효과를 고려하여야 할 것이다.

핵심용어 : 해상풍력발전, 콘크리트 석션식 지지구조, 지진응답, 지반-구조물 상호작용