유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 해상풍력발전기의 지진응답해석

Earthquake Response Analysis of an Offshore Wind Turbine Considering Fluid-Structure-Soil Interaction

이진호¹⁾ · 이상봉²⁾ · 김재관³⁾

Lee, Jin Ho · Lee, Sangbong · Kim, Jae Kwan

국문 요약 >> 이 논문에서는 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 해상풍력발전기의 지진응답해석법을 제시하였다. 풍력발전기는 tower와 그 정점에 집중된 질량으로 모델링 되었다. 이 tower는 유연한 해저지반에 기초하고 있는 튜브형 cantilever로 이상화하였다. Tower와 해수 간의 동적 상호작용, 기초와 지반간의 동적 상호작용이 고려된 유체-구조물-지반 연성계의 지배방정식은 부분구조법과 Rayleigh-Ritz방법에 의해서 유도되었다. 해수는 압축성 비점성 이상 유체로 이상화하였다. 해수로 포화된 층상지반에 놓인 footing의 동적 강성은 Thin Layer법에 의해서 계산하여 상부구조물 모델과 결합시켰다. 이 해석법을 해상풍력발전기 모델의 지진응답해석에 적용하였다. 해석 결과를 준거해와 비교해서 제안한 해석법의 타당성을 검증하였다. Tower의 유연성, 지반의 강성이 해상풍력발전기 지진거동에 미치는 영향을 분석하였다. 유체-구조물 상호작용과 지반-구조물 상호작용의 지진응답에 대한 상대적인 중요도를 비교 평가하였다.

주요어 해상구조물, 풍력발전기, 지진응답, 유체-구조물 상호작용, 지반-구조물 상호작용

ABSTRACT >> In this study, an analysis method for the earthquake response of an offshore wind turbine model is developed, considering the effects of the fluid-structure-soil interaction. The turbine is modeled as a tower with a lumped mass at the top of it. The tower is idealized as a tubular cantilever founded on flexible seabed. Substructure and Rayleigh-Ritz methods are used to derive the governing equation of a coupled structure-fluid-soil system incorporating interactions between the tower and sea water and between the foundation and the flexible seabed. The sea water is assumed to be a compressible but non-viscous ideal fluid. The impedance functions of a rigid footing in water-saturated soil strata are obtained from the Thin-Layer Method (TLM) and combined with the superstructure model. The developed method is applied to the earthquake response analysis of an offshore wind turbine model. The method is verified by comparing the results with reference solutions. The effects of several factors, such as the flexibility of the tower, the depth of the sea water, and the stiffness of the soil, are examined and discussed. The relative significance of the fluid-structure interaction over the soil-structure interaction is evaluated and vice versa.

Key words Offshore structure, Wind turbine, Earthquake response, Fluid-structure interaction, Soil-structure interaction

1. 서론

최근 우리나라를 포함하여 전세계적으로 기상이변이 속출하고 있는 가운데, 이에 대한 원인으로 지구 온난화를 첫 번째로 꼽고 있다. 이 지구 온난화를 방지하고 기후변화에

대응하기 위하여, 화석에너지가 아닌 신재생에너지에 대한 관심이 전세계적으로 급증하고 있고, 우리나라에서도 “녹색성장”의 정책 기초 아래 다양한 신재생에너지가 주목을 받고 있다. 전통적으로 많은 관심을 받은 태양열 발전 외에, 최근에는 풍력발전, 조류발전, 파력발전 등과 같은 다양한 친환경 에너지가 관심을 받고 있는데, 그 중에서도 풍력발전은 최근 상용화가 이루어져 전세계적으로 많은 풍력발전 단지가 건설되었고 또 건설 중에 있다.⁽¹⁾ 우리나라 정부도 향후 풍력발전 시장에서 우위를 점하기 위한 장기적인 계획을 세우고 이를 진행 중이다.⁽²⁻⁴⁾

풍력발전은 지금까지는 육상풍력발전을 위주로 진행되어왔지만, 향후에는 해상풍력발전의 규모가 이를 능가할 것

1) 정회원 · 서울대학교 BK 21사회기반건설사업단, 계약부교수

2) 삼성건설 상품기술연구소, 주임

3) 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부, 교수

(교신저자: jkwankim@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 3. 5 / 수정일 2012. 4. 9 / 게재확정일 : 2012. 4. 10)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

으로 예상된다. 해상풍력발전은 육상풍력발전에 비하여 용지 확보가 용이하고, 주변 환경에 대한 소음의 영향도 자유로울 수 있다는 장점이 있다. 또한, 육상에 비하여 해상에서는 지속적으로 강한 바람을 얻을 수 있다. 하지만, 해상풍력발전기는 그 건설 비용이 육상풍력발전기보다 고가이므로, 비용 효율적으로 발전시설을 건설하기 위해서는 구조물 거동의 정확한 예측이 가능할 수 있어야 한다.⁽¹⁻⁴⁾

과거 지진에 의한 구조물의 손상이나 붕괴는 인명과 재산에 많은 피해를 주었다. 그러나 이제는 전세계적으로 지진에 대한 연구가 활발히 진행되어 대비를 함으로써 그 피해와 파급효과를 감소시키고 있다. 만약 해상풍력발전기가 지진으로 인해서 심각한 손상을 입거나 파손된다면 환경에도 큰 피해를 줄 수 있을 뿐 아니라 막대한 복구비용을 유발시키고 에너지 공급에도 큰 차질을 빚을 수 있다. 그러므로 해상풍력발전기는 지진에 대해서 일반 구조물 보다는 한층 높은 수준의 안전성을 보장할 수 있도록 설계되고 유지되어야 할 필요가 있다.

지진 하중이 작용하면 해상풍력발전기의 Tower에는 해수와 상호작용에 의해서 추가적인 동수압이 작용하게 된다. 유체에 의한 동수압 하중을 받는 콘크리트담과 액체 저장탱크의 동적 거동에 대한 기존의 연구 결과를 살펴보면, 유체와 구조물의 상호작용은 이러한 구조물의 동적 거동에 상당한 영향을 끼침이 확인되었다.^{(5),(6)} 또한 이 구조물들에 대해서 유연한 지반과 구조물의 상호작용 또한 무시할 수 없음이 알려져 있다. 이와 같은 사실로부터 해상풍력발전기의 지진 시 동적 거동 또한 유체-구조물-지반의 상호작용에 의해서 큰 영향을 받는다는 것을 예상할 수 있고 설계에서 반드시 고려되어야 할 필요가 있다.⁽⁷⁾

이 연구에서는 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 해상풍력발전기의 지진응답 해석기법을 제시하고자 한다. 풍력발전기는 그림 1에 묘사된 바와 같이 일반적으로 (1) Rotor, (2) Power Train을 내부에 포함하는 Nacelle, (3) Tower, (4) Foundation으로 구성된다.⁽¹⁾ 해상풍력발전기의 경우에는 해수와 접하는 경계면에서 Tower와 해수의 동적 상호작용이 발생하므로 이를 반영하기 위해서 해수 영역이 또 하나의 부구조체로 포함되어야 한다. 만약 해저지반이 연약하거나 유연성이 높다면 Foundation의 모델링에 있어서 지반-구조물 상호작용이 또한 반드시 고려되어야 한다. 이 경우 확대기초 또는 파일기초는 무한 지반에서의 탄성파의 전파와 방사를 잘 묘사하는 기법에 의해서 모델링 되어야 하며, 또 하나의 부구조로 모델링 될 수 있다.

이 논문의 주 목적은 해상풍력발전기가 지진 하중을 받을

때 실제적이면서도 정확도가 높은 유체-구조물-지반 상호작용 해석방법을 제시하는 것이다. 이 해석모델은 복잡하지 않으면서도 중요한 역학적 관계를 잘 표현할 수 있어야 할 것이고 실제 해양구조물의 내진설계와 내진성능평가에 직접 활용할 수 있어야 할 것이다. 나아가 더 복잡한 문제를 해석하는데 용이하게 확대될 수 있어야 한다. 여기서 제시하는 해석법은 이러한 전제 조건을 잘 만족하고 있다고 판단된다.

먼저 상부 구조체 모델링에 있어서 Tower는 밑면이 고정된 튜브 형 Cantilever로, Rotor와 Power Train을 내부에 포함하는 Nacelle은 Tower 상단에 집중된 질량으로 이상화하였다. 해수는 Tower와의 접촉면에서 Tower와 동수압을 교환하게 된다. 역학적 관점에서 해수의 영역은 하나의 부구조로 간주될 수 있으며, 이 연구에서는 해수를 비점성 압축성 이상 유체로 가정하였다.

Foundation은 층상지반에 놓인 Rigid Footing으로 이상화하였으며 해저지반은 또 하나의 부구조로 간주하고 층상 무한지반에서의 탄성파의 전파와 방사를 잘 묘사하는 Thin Layer 방법(Thin Layer Method, TLM)에 의해서 모델링되었다. 지반의 매질은 해수로 포화된 2상 매질로 이상화되었다. 이 논문에서 확대기초가 사용되었지만 제시하는 방법은 훨씬 일반적인 형태의 묻힌 기초, 파일기초로 확장될 수 있다.

Tower의 동적 거동은 Cantilever의 고유모드의 중첩으로 표현하였고, 전체 연성계의 지배운동방정식을 Lagrange Equation으로부터 도출하였다. 이 최종 운동방정식을 사용하여 유체-구조물-지반의 상호작용이 잘 고려된 해상풍력발전기의 모델의 지진응답해석을 수행하였다. 결과를 기존의 준거해와 비교해서 타당성을 검증하였다. 나아가, Tower의 유연성, 지반의 강성이 해상풍력발전기 지진거동에 미치는 영향을 분석하였다. 유체-구조물 상호작용과 지반-구조물 상호작용의 지진응답에 대한 상대적인 중요도를 비교 평가하였다.

2. 유체-구조물-지반 연성계

그림 1(a)에 보인 바와 같이 해상풍력발전기는 유연한 구조물, 해수, 해수로 포화된 지반이 서로 상호작용하는 유체-구조물-지반 연성계이다. 서론에서 설명한 바와 같이 해수 영역은 Tower의 접촉면에서 Tower와 동수압을 주고받는다. 유연한 지반과 Tower의 상호작용은 Tower의 Footing에서 발생한다. 이와 같은 가정하에 전체 연성구조계는 그림 1(b)와

〈그림 1〉 해상풍력발전기 모델

같이 3개의 부분구조로 분리하여 모델링 하는 것이 가능하다.

해상풍력발전기의 상부구조인 Tower는 축대칭 Cantilever로 가정하였다. Rotor와 Power Train을 포함한 Nacelle은 Tower의 정점에 부착된 집중질량으로 모델링 되었다. Tower의 길이(높이)는 L 이고, 중공원형 단면으로서 바깥 반지름은 R 로 일정하며, 보의 단위 길이당 질량 m 과 휨강성 EI 도 높이에 따라서 일정하다고 전제한다. Foundation도 축대칭 형상을 갖는 것으로 가정하고 원주좌표계를 사용하여 전체 구조계의 동적 거동을 서술하고자 한다.

지진지반운동의 수직성분의 영향도 평가에 포함되어야 하지만 이 연구에서는 수평지반운동에 대한 응답 해석법을 우선 제시하고자 한다. 이 경우, 원주 좌표계에서 변위와 힘

〈그림 2〉 Tower Model

은 원주방향으로 $\cos\theta$ 의 분포를 가지게 되므로, 아래에서는 이 분포를 가정하고 운동방정식을 서술할 것이다.⁽⁸⁾

Footing은 원형강체로 가정하였다. 그러면, 그림 2에 보인 바와 같이, 구조물의 변위는 강체기초의 수평운동에 의한 변위 $\Delta(t)$, 회전운동에 의한 변위 $z\phi(t)$, 이에 대한 상대변위 $u(z,t)$ 의 합으로 표현할 수 있다. Tower의 상대변위 $u(z,t)$ 는 다음과 같이 Rayleigh-Ritz 방법을 이용하여 Cantilever의 고유모드의 합으로 표현할 수 있다.⁽⁹⁾

$$u(z,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i(z) q_i(t) \quad (1a)$$

$$\psi_i(z) = \cosh \beta_i z - \cos \beta_i z - \frac{\cosh \beta_i L + \cos \beta_i L}{\sinh \beta_i L + \sin \beta_i L} (\sinh \beta_i z - \sin \beta_i z) \quad (1b)$$

$$\beta_i = \left(\frac{\omega_i^2 m}{EI} \right)^{1/4} \quad (1c)$$

여기서 ω_i 는 cantilever의 i 번째 고유진동수로서 처음 4개의 고유진동수는 $\omega_1 = \frac{3.516}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$, $\omega_2 = \frac{22.03}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$, $\omega_3 = \frac{61.70}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$, $\omega_4 = \frac{120.9}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$ 와 같이 주어진다.

해수는 비점성의 압축성 이상 유체로 가정하였고, 그 깊이는 H 로 일정하며 반경방향으로 무한하다고 가정하였다. 구조물이 위치하는 지반은 해수로 포화된 다공성 2상 매질로 가정하고, 구조물과 지반의 상호작용을 모델링하였다. 지반의 일정 깊이부터는 아주 단단한 기반암이 존재한다고 가정하였다.

이상과 같은 유체-구조물-지반 상호작용계의 운동방정식

을 다음과 같이 유도하여 해상풍력발전기의 지진응답해석을 수행하였다.

3. 해상풍력발전기 Tower에 작용하는 동수압

유연한 Tower와 해수와의 상호작용을 고려하여 해상풍력발전기의 Tower에 작용하는 동수압에 관한 식을 유도하였다. 비점성 압축성 이상 유체인 해수의 동수압에 관한 지배방정식은 주파수영역에서 다음과 같다.^{(10),(11)}

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{C_w^2} p = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{p}{r^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{C_w^2} p = 0 \quad (2)$$

여기서 $p(r, z, \omega)$ 는 해수의 동수압 진폭, C_w 는 해수의 압축파 속도이다. 해수 영역의 모델은 그림 3에 묘사되어 있다. 해수면에서의 동수압은 대기압과 같고, Tower와의 접촉면에서 해수의 가속도는 Tower와 동일하고 해저에서 가속도의 수직성분은 영이라고 가정한다. 이러한 해수 영역의 경계조건과 무한영역으로의 방사조건은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho_w \omega^2 [\Delta(\omega) + z\phi(\omega) + u(z, \omega)] \quad \text{at } r = R \quad (3a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (3b)$$

$$p(r, z, \omega) = 0 \quad \text{at } z = H \quad (3c)$$

$$p(r, z, \omega) = 0 \quad \text{as } r \rightarrow \infty \quad (3d)$$

여기서 ρ_w 는 해수의 밀도이다.

주어진 지배방정식과 경계조건을 만족하는 동수압의 진폭은 변수분리법에 의해서 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$p(r, z, \omega) = R(r, \omega)Z(z, \omega) \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 분리된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - \left(\frac{1}{r^2} - k^2 \right) R = 0 \quad (5a)$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{C_w^2} - k^2 \right) Z = \frac{d^2 Z}{dz^2} + \lambda^2 Z = 0 \quad (5b)$$

여기서

$$\lambda^2 = \frac{\omega^2}{C_w^2} - k^2 \quad (6)$$

식 (5b)는 경계조건 (3b), (3c)와 함께 고유값 문제를 구성하고, 이로부터 다음의 고유값과 고유함수를 얻을 수 있다.

$$\lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2H} \quad n=1, 2, \dots \quad (7a)$$

$$Z_n(z, \omega) = \cos \lambda_n z \quad (7b)$$

그리고, 식 (5a)의 Bessel 방정식과 식 (3d)의 방사조건을 만족하는 해는 다음과 같다.

$$R(r, \omega) = H_1^{(2)}(kr) \quad (8)$$

여기서 $H_1^{(2)}$ 는 제2종 제1차 Hankel 함수이고, k 는 양의 실수이거나 음의 허수부를 가지는 복소수이어야 한다. 각 모드를 중첩하면 식 (7)과 (8)로부터 유체의 동수압의 진폭이 다음과 같이 구해진다.

$$p(r, z, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n(\omega) R_n(r, \omega) Z_n(z, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n(\omega) H_1^{(2)}(k_n r) \cos \lambda_n z \quad (9)$$

여기서 $\Gamma_n^{(\omega)}$ 은 n 번째 모드의 참여계수이다. 경계조건 (3a)를 활용하여 모드 참여계수를 구조물의 변위에 관한 식으로 표현할 수 있다. 식 (9)를 식 (3a)에 대입하면 다음 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n k_n \frac{dH_1^{(2)}(k_n r)}{d(k_n r)} \bigg|_{r=R} \cos \lambda_n z = \rho_w \omega^2 [\Delta(\omega) + z\phi(\omega) + u(z, \omega)] \quad (10)$$

식 (10)의 양변에 $\cos \lambda_m z$ 를 곱하고 깊이 방향으로 적분하고 직교조건을 이용하면 Γ_m 에 관한 식이 다음과 같이 유도된다.

$$\Gamma_m(\omega) = \frac{2\rho_w \omega^2}{H} \frac{1}{k_m \frac{dH_1^{(2)}(k_m r)}{d(k_m r)} \Big|_{r=R}} \times \left[\frac{(-1)^{m+1} \Delta(\omega)}{\lambda_m} + \left\{ \frac{(-1)^{m+1} H}{\lambda_m} - \frac{1}{\lambda_m^2} \right\} \phi(\omega) + \int_0^H u(z, \omega) \cos \lambda_m z dz \right] \quad (11)$$

식 (11)을 식 (9)에 대입하면 동수압의 진폭에 관한 최종 식이 다음과 같이 얻어진다.

$$p(r, z, \omega) = -\omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(r) \cos \lambda_n z \times \left[\frac{(-1)^{n+1} \Delta(\omega)}{\lambda_n} + \left\{ \frac{(-1)^{n+1} H}{\lambda_n} - \frac{1}{\lambda_n^2} \right\} \phi(\omega) + \sum_{i=1}^{\infty} q_i(\omega) \int_0^H \psi_i(z) \cos \lambda_n z dz \right] \quad (12a)$$

$$\eta_n(r) = -\frac{2\rho_w}{H} \frac{H_1^{(2)}(k_n r)}{k_n \frac{dH_1^{(2)}(k_n r)}{d(k_n r)} \Big|_{r=R}} \quad (12b)$$

강체기반에 위치한 강체 구조물에 수평지반운동 $\ddot{u}_g(\omega)$ 가 작용할 경우, 식 (12)에서 $-\omega^2 \Delta(\omega) = \ddot{u}_g(\omega)$, $\phi(\omega) = 0$, $q_i(\omega) = 0$ 이므로, 구조물에 가해지는 해수의 동수압의 진폭과 단위 폭당 높이에 대한 동수압 진폭의 합은 각각 다음과 같이 주어지게 된다.

$$p(R, z, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\lambda_n} \ddot{u}_g(\omega) \eta_n(R) \cos \lambda_n z \quad (13a)$$

$$F_p(R, \omega) = \int_0^H p(R, z, \omega) dz = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2} \ddot{u}_g(\omega) \eta_n(R) \quad (13b)$$

만약 구조물의 반지름 R 이 아주 커지게 되면, 동수압이 작용하는 원통면은 거의 평면에 가까워지게 된다. 즉, R 이 아주 큰 경우, 식 (13a)와 식 (13b)가 평면 구조물에 작용하는 동수압의 진폭과 합으로 수렴하여야 한다. $R \rightarrow \infty$ 일 때, 식 (12b)의 Hankel 함수와 그 미분은 다음과 같이 수렴하게 된다.⁽¹²⁾

$$H_1^{(2)}(k_n R) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi k_n R}} \exp \left[-i \left(k_n R - \frac{3\pi}{4} \right) \right] \quad (14a)$$

$$\frac{dH_1^{(2)}(k_n r)}{d(k_n r)} \Big|_{r=R} = H_1^{(2)}(k_n R) - \frac{1}{k_n R} H_1^{(2)}(k_n R) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi k_n R}} \exp \left[-i \left(k_n R - \frac{\pi}{4} \right) \right] - \frac{1}{k_n R} \sqrt{\frac{2}{\pi k_n R}} \exp \left[-i \left(k_n R - \frac{3\pi}{4} \right) \right] \quad (14b)$$

그러므로, R 이 아주 큰 경우 $\eta_n(R)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \eta_n(R) = \frac{2\rho_w}{H} \frac{1}{ik_n} = \frac{2\rho_w}{H} \frac{1}{\sqrt{\lambda_n^2 - \frac{\omega^2}{C_w^2}}} \quad (14c)$$

식 (14c)를 식 (13)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\lim_{R \rightarrow \infty} p(R, z, \omega) = \frac{2\rho_w}{H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\lambda_n} \frac{1}{\sqrt{\lambda_n^2 - \frac{\omega^2}{C_w^2}}} \ddot{u}_g(\omega) \cos \lambda_n z = \frac{4\rho_w}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1) \sqrt{\lambda_n^2 - \frac{\omega^2}{C_w^2}}} \ddot{u}_g(\omega) \cos \lambda_n z \quad (15a)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} F_p(R, \omega) = \frac{2\rho_w}{H} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2} \frac{1}{\sqrt{\lambda_n^2 - \frac{\omega^2}{C_w^2}}} \ddot{u}_g(\omega) = \frac{\rho_w H^2}{2} \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 \sqrt{(2n-1)^2 - \omega^2 \left(\frac{2H}{\pi C_w} \right)^2}} \ddot{u}_g(\omega) \quad (15b)$$

식 (15)는 정확히 평면 구조물에 작용하는 동수압과 합임을 확인할 수 있다.⁽¹³⁾

4. 해상풍력발전기의 지반-구조물 상호작용력

유연한 구조물과 해수로 포화된 지반의 상호작용을 고려하여 해상풍력발전기에 작용하는 상호작용력에 관한 식을 유도하였다. 다공성 2상 매질인 해수로 포화된 지반의 운동 방정식은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

〈그림 3〉 해수 영역 모델

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \ddot{\mathbf{u}} + \rho_w \ddot{\mathbf{w}} \quad (16a)$$

$$\nabla p_{pore} + \mathbf{f} \ddot{\mathbf{w}} + \rho_w \ddot{\mathbf{u}} + \frac{\rho_w}{n} \ddot{\mathbf{w}} = 0 \quad (16b)$$

$$\frac{1}{Q} \dot{p}_{pore} + (\boldsymbol{\alpha} \nabla) \cdot \dot{\mathbf{u}} + \nabla \cdot \dot{\mathbf{w}} = 0 \quad (16c)$$

여기서 $\boldsymbol{\sigma}$ 는 흙의 전응력, $\mathbf{u}$ 는 흙의 변위, $\mathbf{w} = n(\mathbf{U} - \mathbf{u})$ 는 $\dot{\mathbf{w}}$ 이 평균 상대 침투속도가 되도록 정의한 흙에 대한 간극수의 상대변위(Pseudo-Displacement)이며 $\mathbf{U}$ 는 간극수의 변위이다. p_{pore} 는 간극수압, n 은 간극률, ρ_w 는 간극수의 밀도, $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_w$ 는 흙과 간극수 혼합물의 평균 밀도인데 ρ_s 는 흙 입자의 밀도이다. $\mathbf{f} = \boldsymbol{\kappa}^{-1}$ 이고 $\boldsymbol{\kappa}$ 는 투수계수 Tensor이다. $\boldsymbol{\alpha}$ 와 Q 는 2상 매질의 압축성을 나타내는 일반화된 Biot의 상수이다. 전응력 $\boldsymbol{\sigma}$ 는 흙의 유효응력인 $\boldsymbol{\sigma}'$, 간극수압 p_{pore} , 일반화된 Biot의 상수 $\boldsymbol{\alpha}$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{\alpha} p_{pore} = \mathbf{D} : \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\alpha} p_{pore} = \mathbf{D} : \nabla \mathbf{u} - \boldsymbol{\alpha} p_{pore} \quad (17)$$

여기서 $\mathbf{D}$ 는 매질의 탄성계수 tensor, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 은 흙의 변형률이고, 4차 tensor $\mathbf{D}$ 와 2차 tensor $\boldsymbol{\varepsilon}$ 간에 작용하는 연산자 :는 $\mathbf{D} : \boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{i,j,k,l=1}^3 D_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ 와 같이 정의된다.

그림 4와 같이 지반의 일정 깊이부터는 강체 기반암이 존재하고, 이 기반암에 수평지반운동 $\ddot{u}_{bedrock}(\omega)$ 이 작용한다고 가정한다. 설계지반운동인 자유장 운동 $\ddot{u}_g(\omega)$ 가 주어지면 층상지반에서 전파하는 지진파에 대한 Deconvolution 해석을 수행하여 강체 기반암의 수평운동 $\ddot{u}_{bedrock}(\omega)$ 을 구할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 그림 4에 묘사된 바와 같이 불규칙하고 비균질할 수 있는 근역 지반은 유한요소로 모델링하고, 깊이가 일정하고 균질한 원역 지반은 전달경계를 사용하여 모델링하면,⁽¹⁵⁾ 이러한 지반에 놓인 무질량 강체기초의 운동방정식과 상부구조물에 가해지는 상호작용력을 다음과 같이 얻을 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$\begin{bmatrix} S_{\Delta\Delta}^g(\omega) & S_{\Delta\phi}^g(\omega) \\ S_{\phi\Delta}^g(\omega) & S_{\phi\phi}^g(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta(\omega) - \Delta^0(\omega) \\ \phi(\omega) - \phi^0(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{\Delta}^g(\omega) \\ M_{\phi}^g(\omega) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

여기서, $S_{ij}^g(\omega)$, $i, j = \Delta, \phi$ 는 기초의 동적강성이고, Δ^0 와 ϕ^0 는 각각 기초의 수평운동과 회전운동에 대한 입력운동을 의

미한다. 기초 입력운동의 위첨자 0은 상부구조물이 없고 기초만 있는 경우를 의미하고, 기초의 입력운동은 어떠한 외력도 작용하지 않을 때 지반운동에 대한 기초의 응답을 의미한다.⁽¹⁷⁾ 식 (18)에서 기초의 동적강성과 입력운동은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_{\Delta\Delta}^g & S_{\Delta\phi}^g \\ S_{\phi\Delta}^g & S_{\phi\phi}^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\Delta\Delta}^n & S_{\Delta\phi}^n \\ S_{\phi\Delta}^n & S_{\phi\phi}^n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_{\Delta n}^n & S_{\Delta f}^n \\ S_{\phi n}^n & S_{\phi f}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{nn}^n & S_{nf}^n \\ S_{fn}^n & S_{ff}^n + S_{ff}^f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{n\Delta}^n & S_{n\phi}^n \\ S_{f\Delta}^n & S_{f\phi}^n \end{bmatrix} \quad (19a)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta^0 \\ \phi^0 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} S_{\Delta\Delta}^g & S_{\Delta\phi}^g \\ S_{\phi\Delta}^g & S_{\phi\phi}^g \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_{\Delta n}^n & S_{\Delta f}^n \\ S_{\phi n}^n & S_{\phi f}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{nn}^n & S_{nf}^n \\ S_{fn}^n & S_{ff}^n + S_{ff}^f \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{S}_{ff}^f \mathbf{U}_f^* + \mathbf{P}_f^* \end{Bmatrix} \quad (19b)$$

$$\mathbf{S}^n = -\omega^2 \mathbf{M}^n + (1 + 2i\xi) \mathbf{K}^n \quad (19c)$$

$$\mathbf{S}^f = R_b [\mathbf{A}^f \boldsymbol{\Psi}^f \mathbf{K}_{eig}^2 + (\mathbf{D}^f - \mathbf{E}^f + \mathbf{N}^f) \boldsymbol{\Phi}^f \mathbf{K}_{eig} - (\mathbf{L}^f + \mathbf{Q}^f) \boldsymbol{\Psi}^f] (\mathbf{Y}^f)^{-1} \quad (19d)$$

여기서 아래첨자 n 은 기초와 전달경계면에 위치하지 않고 근역 지반에만 속하는 자유도를, 아래첨자 f 는 전달경계면에 위치한 자유도를 의미한다. 위첨자 n 은 근역 지반을, 위첨자 f 는 원역 지반을 의미한다. 식 (19b)의 $\mathbf{U}_f^*(\omega)$ 와 $\mathbf{P}_f^*(\omega)$ 는 자유장 지반에서의 응답을 의미한다.^{(15),(17)} 식 (19c)의 근역 지반의 질량행렬 $\mathbf{M}^n$, 강성행렬 $\mathbf{K}^n$ 은 참고문헌 18의 이진호 등 (2009)에 주어진 다공성 2상 매질에 대한 유한요소로부터 구성할 수 있고, ξ 는 지반의 이력감쇠비이다. 식 (19d)에서 R_b 는 기초의 반지름을 의미하고, 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 $\mathbf{K}_{eig}(\omega)$, $\boldsymbol{\Psi}^f(\omega)$, $\boldsymbol{\Phi}^f(\omega)$, $\mathbf{Y}^f(\omega)$ 는 참고문헌 18의 이진호 등 (2009)에 정의되어 있다.

〈그림 4〉 해수로 포화된 지반 영역의 모델링

5. 해상풍력발전기의 운동방정식

해수로 포화된 유연한 지반의 영향을 고려하여, 식 (12)의 동수압이 가해지는 유연한 해상풍력발전기 구조물의 운동방정식을 유도하였다. 상부구조에서 발생하는 운동에너지, 변형에너지, 감쇠에 의해 소산되는 에너지, 외력에 의한 일에 Lagrange Equation을 적용하여 운동방정식을 구한다.

기초와 구조물에 발생하는 운동에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L m \left[\dot{\Delta}(t) + z\dot{\phi}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i(z) \dot{q}_i(t) \right]^2 dz + \frac{1}{2} M \left[\dot{\Delta}(t) + L\dot{\phi}(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i(L) \dot{q}_i(t) \right]^2 + \frac{1}{2} M_b [\dot{\Delta}(t)]^2 + \frac{1}{2} I_b [\dot{\phi}(t)]^2 \quad (20)$$

여기서 M 은 Rotor와 Power Train을 포함한 Nacelle의 집중질량이고, M_b 는 원형 기초의 질량, I_b 는 원형 기초의 회전관성이다. Tower에 저장되는 변형에너지는 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left[\sum_{i=1}^{\infty} \frac{d^2 \psi_i(z)}{dz^2} q_i(t) \right]^2 dz \quad (21)$$

여기서 EI 은 구조물의 휨 강성이다. Tower에 작용하는 동수압과 기초에 작용하는 상호작용력이 하는 일은 다음과 같다.

$$W_e = -\pi R \int_0^H p(R, z, t) \left[\Delta(t) + z\phi(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i(z) q_i(t) \right] dz + P_{\Delta}^s(t) \Delta(t) + M_{\phi}^s(t) \phi(t) \quad (22)$$

각 자유도에 대한 Lagrange Equation은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = \frac{\partial W_e}{\partial q_i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (23a)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\Delta}} + \frac{\partial V}{\partial \Delta} = \frac{\partial W_e}{\partial \Delta} \quad (23b)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} + \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{\partial W_e}{\partial \phi} \quad (23c)$$

구조물의 고유모드 중 처음 N 개만 고려하고, 식 (20) -

(22)를 식 (23)에 대입하여 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N (-\omega^2 M_{ij} + K_{ij}) q_j(\omega) - \omega^2 M_{i\Delta} \Delta(\omega) - \omega^2 M_{i\phi} \phi(\omega) = -\pi R \int_0^H p(R, z, \omega) \psi_i(z) dz \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (24a)$$

$$-\omega^2 \sum_{j=1}^N M_{\Delta j} q_j(\omega) - \omega^2 M_{\Delta\Delta} \Delta(\omega) - \omega^2 M_{\Delta\phi} \phi(\omega) = -\pi R \int_0^H p(R, z, \omega) dz + P_{\Delta}^s(\omega) \quad (24b)$$

$$-\omega^2 \sum_{j=1}^N M_{\phi j} q_j(\omega) - \omega^2 M_{\phi\Delta} \Delta(\omega) - \omega^2 M_{\phi\phi} \phi(\omega) = -\pi R \int_0^H z p(R, z, \omega) dz + M_{\phi}^s(\omega) \quad (24c)$$

여기서

$$M_{ij} = \int_0^L m \psi_i(z) \psi_j(z) dz + M \psi_i(L) \psi_j(L) \quad (25a)$$

$$M_{i\Delta} = M_{\Delta i} = \int_0^L m \psi_i(z) dz + M \psi_i(L) \quad (25b)$$

$$M_{i\phi} = M_{\phi i} = \int_0^L z m \psi_i(z) dz + M L \psi_i(L) \quad (25c)$$

$$M_{\Delta\Delta} = \int_0^L m dz + M + M_b \quad (25d)$$

$$M_{\Delta\phi} = M_{\phi\Delta} = \int_0^L z m dz + M L \quad (25e)$$

$$M_{\phi\phi} = \int_0^L z^2 m dz + M L^2 + I_b \quad (25f)$$

$$K_{ij} = \int_0^L EI \frac{d^2 \psi_i(z)}{dz^2} \frac{d^2 \psi_j(z)}{dz^2} dz \quad (25g)$$

동수압의 진폭에 대한 식 (12)를 식 (24)에 대입하여 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N [-\omega^2 (M_{ij} + M_{ij}^{add}) + K_{ij}] q_j(\omega) - \omega^2 (M_{i\Delta} + M_{i\Delta}^{add}) \Delta(\omega) - \omega^2 (M_{i\phi} + M_{i\phi}^{add}) \phi(\omega) = 0 \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (26a)$$

$$-\omega^2 \sum_{j=1}^N (M_{\Delta j} + M_{\Delta j}^{add}) q_j(\omega) - \omega^2 (M_{\Delta\Delta} + M_{\Delta\Delta}^{add}) \Delta(\omega) - \omega^2 (M_{\Delta\phi} + M_{\Delta\phi}^{add}) \phi(\omega) = P_{\Delta}^s(\omega) \quad (26b)$$

$$-\omega^2 \sum_{j=1}^N (M_{\phi j} + M_{\phi j}^{add}) q_j(\omega) - \omega^2 (M_{\phi\Delta} + M_{\phi\Delta}^{add}) \Delta(\omega) - \omega^2 (M_{\phi\phi} + M_{\phi\phi}^{add}) \phi(\omega) = M_{\phi}^s(\omega) \quad (26c)$$

여기서

$$M_{ij}^{add} = \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(R) \int_0^H \psi_i(z) \cos \lambda_n z dz \int_0^H \psi_j(z) \cos \lambda_n z dz \quad (27a)$$

$$M_{i\Delta}^{add} = M_{\Delta i}^{add} = \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{\lambda_n} \eta_n(R) \int_0^H \psi_i(z) \cos \lambda_n z dz \quad (27b)$$

$$M_{i\phi}^{add} = M_{\phi i}^{add} = \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n+1} H}{\lambda_n} - \frac{1}{\lambda_n^2} \right\} \eta_n(R) \int_0^H \psi_i(z) \cos \lambda_n z dz \quad (27c)$$

$$M_{\Delta\Delta}^{add} = \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\eta_n(R)}{\lambda_n^2} \quad (27d)$$

$$M_{\Delta\phi}^{add} = M_{\phi\Delta}^{add} = \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{H}{\lambda_n^2} + \frac{(-1)^n}{\lambda_n^3} \right\} \eta_n(R) \quad (27e)$$

$$M_{\phi\phi}^{add} = \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n+1} H}{\lambda_n} - \frac{1}{\lambda_n^2} \right\}^2 \eta_n(R) \quad (27f)$$

그림 4와 같이 구조물과 지반과의 상호작용력은 $P_{\Delta}^s + P_{\Delta}^g = 0$ 과 $M_{\Delta}^s + M_{\Delta}^g = 0$ 의 관계를 만족시키므로 식 (18)을 식 (26)에 대입하면 최종 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N [-\omega^2 (M_{ij} + M_{ij}^{add}) + K_{ij}] q_j(\omega) - \omega^2 (M_{i\Delta} + M_{i\Delta}^{add}) \Delta(\omega) - \omega^2 (M_{i\phi} + M_{i\phi}^{add}) \phi(\omega) = 0$$

for $i = 1, 2, \dots, N$ (28a)

$$-\omega^2 \sum_{j=1}^N (M_{\Delta j} + M_{\Delta j}^{add}) q_j(\omega) + [-\omega^2 (M_{\Delta\Delta} + M_{\Delta\Delta}^{add}) + S_{\Delta\Delta}^g(\omega)] \Delta(\omega) + [-\omega^2 (M_{\Delta\phi} + M_{\Delta\phi}^{add}) + S_{\Delta\phi}^g(\omega)] \phi(\omega) = S_{\Delta\Delta}^g(\omega) \Delta^0(\omega) + S_{\Delta\phi}^g(\omega) \phi^0(\omega) \quad (28b)$$

$$-\omega^2 \sum_{j=1}^N (M_{\phi j} + M_{\phi j}^{add}) q_j(\omega) + [-\omega^2 (M_{\phi\Delta} + M_{\phi\Delta}^{add}) + S_{\phi\Delta}^g(\omega)] \Delta(\omega) + [-\omega^2 (M_{\phi\phi} + M_{\phi\phi}^{add}) + S_{\phi\phi}^g(\omega)] \phi(\omega) = S_{\phi\Delta}^g(\omega) \Delta^0(\omega) + S_{\phi\phi}^g(\omega) \phi^0(\omega) \quad (28c)$$

구조물의 감쇠를 이력감쇠로 가정하고, 식 (28)을 행렬식의 형태로 표현하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} -\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{qq} + \mathbf{M}_{qq}^{add} & \mathbf{M}_{q\Delta} + \mathbf{M}_{q\Delta}^{add} & \mathbf{M}_{q\phi} + \mathbf{M}_{q\phi}^{add} \\ \mathbf{M}_{\Delta q} + \mathbf{M}_{\Delta q}^{add} & M_{\Delta\Delta} + M_{\Delta\Delta}^{add} & M_{\Delta\phi} + M_{\Delta\phi}^{add} \\ \mathbf{M}_{\phi q} + \mathbf{M}_{\phi q}^{add} & M_{\phi\Delta} + M_{\phi\Delta}^{add} & M_{\phi\phi} + M_{\phi\phi}^{add} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1+2i\eta)\mathbf{K} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & S_{\Delta\Delta}^g & S_{\Delta\phi}^g \\ \mathbf{0} & S_{\phi\Delta}^g & S_{\phi\phi}^g \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta^0 \\ \phi^0 \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \Delta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ S_{\Delta\Delta}^g \Delta^0 + S_{\Delta\phi}^g \phi^0 \\ S_{\phi\Delta}^g \Delta^0 + S_{\phi\phi}^g \phi^0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서

$$\mathbf{M}_{qq} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1} & \cdots & M_{NN} \end{bmatrix} \quad (30a)$$

$$\mathbf{M}_{qq}^{add} = \begin{bmatrix} M_{11}^{add} & \cdots & M_{1N}^{add} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1}^{add} & \cdots & M_{NN}^{add} \end{bmatrix} \quad (30b)$$

$$\mathbf{M}_{q\Delta} = \mathbf{M}_{\Delta q}^T = \begin{bmatrix} M_{1\Delta} \\ \vdots \\ M_{N\Delta} \end{bmatrix} \quad (30c)$$

$$\mathbf{M}_{q\Delta}^{add} = (\mathbf{M}_{\Delta q}^{add})^T = \begin{bmatrix} M_{1\Delta}^{add} \\ \vdots \\ M_{N\Delta}^{add} \end{bmatrix} \quad (30d)$$

$$\mathbf{M}_{q\phi} = \mathbf{M}_{\phi q}^T = \begin{bmatrix} M_{1\phi} \\ \vdots \\ M_{N\phi} \end{bmatrix} \quad (30e)$$

$$\mathbf{M}_{q\phi}^{add} = (\mathbf{M}_{\phi q}^{add})^T = \begin{bmatrix} M_{1\phi}^{add} \\ \vdots \\ M_{N\phi}^{add} \end{bmatrix} \quad (30f)$$

$$\mathbf{K}_{qq} = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & \cdots & K_{NN} \end{bmatrix} \quad (30g)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ \vdots \\ q_N(\omega) \end{bmatrix} \quad (30h)$$

식 (29)에서 η 는 구조물의 이력감쇠비이다. 식 (29)가 해수와 해수로 포화된 지반과의 상호작용을 고려한 해상풍력 발전기 모델의 최종 운동방정식이다.

식 (29)로부터 $q_1(\omega), \dots, q_N(\omega), \Delta(\omega), \phi(\omega)$ 를 구한 후, 이로부터 Tower와 기초를 설계할 때 필요한 Tower 밑면과 기초 밑면에서의 전단력과 휨모멘트를 계산할 수 있다. Tower 밑면의 전단력 $V_b(\omega)$ 와 휨모멘트 $M_b(\omega)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\begin{aligned} V_b(\omega) &= \sum_{i=1}^N V_{b,i}^{st} A_i(\omega) = \sum_{i=1}^N M_i^* A_i(\omega) \\ &= \sum_{i=1}^N \Gamma_i L_i^h A_i(\omega) = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \Gamma_i L_i^h D_i(\omega) = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 L_i^h q_i(\omega) \end{aligned} \quad (31a)$$

$$\begin{aligned}
 M_b(\omega) &= \sum_{i=1}^N M_{b,i}^{st} A_i(\omega) = \sum_{i=1}^N h_i^* M_i^* A_i(\omega) \\
 &= \sum_{i=1}^N \Gamma_i L_i^\theta A_i(\omega) = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \Gamma_i L_i^\theta D_i(\omega) = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 L_i^\theta q_i(\omega)
 \end{aligned} \quad (31b)$$

$$L_i^h = \int_0^L m \psi_i(z) dz \quad (31c)$$

$$L_i^\theta = \int_0^L z m \psi_i(z) dz \quad (31d)$$

여기서 $V_{b,i}^{st} = M_i^* = \Gamma_i L_i^h$ 와 $V_{b,i}^{st} = h_i^* M_i^* = \Gamma_i L_i^\theta$ 는 i 번째 모드의 정적 하중 $s_i(z) = m \Gamma_i \psi_i(z)$ 에 대한 i 번째 모드의 정적 밀면 전단력과 휨모멘트 응답, $M_i^* = \Gamma_i L_i^h$ 와 $h_i^* = L_i^\theta / L_i^h$ 는 i 번째 모드의 유효 모드 질량과 높이, $A_i(\omega) = \omega_i^2 D_i(\omega) = (\omega_i^2 / \Gamma_i) q_i(\omega)$, $\Gamma_i = L_i^h / M_i$, $M_i = \int_0^L m \Psi_i(z) \Psi_i(z) dz$ 는 i 번째 모드의 일반화된 질량이다. 기초 밀면에서의 전단력과 휨모멘트는 식 (18)의 상호작용력 $P_\Delta^q(\omega)$ 와 $M_\phi^q(\omega)$ 로 주어진다.

6. 적용 예제

개발된 해석기법을 이용하여 그림 5의 해상풍력발전기의 지진응답을 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려하여 계산하였다. Tower와 해수, 지반의 물성치는 표 1과 그림 5에 주어져 있다. Cantilever의 고유모드 중 1~6차 모드를 사용하여 Tower의 응답을 식 (1)과 같이 표현하였고, 해수의 동수압에 대해서는 1~40차 모드까지 사용하여 식 (12)와 같이 표현하였다. 또한, 4절점 유한요소를 사용하여 그림 5에 보인 것과 같이 지반의 유한요소망을 구성하였다. 자유장 지반운동 $\ddot{u}_g(t)$ 는 그림 6의 El Centro 지진기록(1940년,

〈그림 5〉 해상풍력발전기 적용 예제

〈그림 6〉 입력 자유장 지반운동 $\ddot{u}_g(t)$

〈표 1〉 해상풍력발전기 모델의 Tower, 해수, 지반 물성치

Tower	탄성계수 E	210 Gpa
	단면 2차 모멘트 I	4.136 m^4
	단위 길이 당 질량 m	3699 kg/m
	최상단 집중 질량 M	92000 kg
	기초 질량 M_b	87500 kg
	이력감쇠비 η	0.03
해 수	밀도 ρ_w	1000 kg/m^3
	압축파 속도 C_w	1439 m/s
지 반	밀도 ρ_s	2640 kg/m^3
	전단파 속도 v_s	270 m/s
	포아송비	0.333
	이력감쇠비 ξ	0.05
	간극률 n	0.3
	투수계수 κ	$1.02 \times 10^{-10} m^3 \text{ sec/kg}$
	Biot 상수 α	0.999

N-S성분, $PGA=0.319g$)을 사용하였다.

6.1 Tower 유연성의 영향

Tower의 유연성이 해수의 동수압에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 유연 구조와 강체 구조에 있어서 동수압을 계산하여 비교하였다. 단, 이 비교에서는 지반-구조물 상호작용을 고려되지 않았다. 그림 7에서는 Tower에 가해지는 동수압력에 의해서 Tower의 밀면에 발생하는 전도모멘트의 시간이력을 비교하였다. 동수압력에 의한 전도모멘트가 최대인 순간에 유연한 구조 모델($t = 2.90\text{sec}$)과 강체 구조 모델($t = 2.12\text{sec}$)에서 발생하는 동수압의 진폭의 높이에 따른 분포를 그림 8에서 비교 하였다. Tower의 유연성이 동수압 분포에 큰 영향을 주고 또 전도모멘트를 대폭 증가시킨

〈그림 7〉 Tower 밑면 전도모멘트의 시간이력에 대한 Tower 유연성의 영향

〈그림 8〉 등수압 진폭의 높이에 따른 분포에 대한 Tower 유연성의 영향

다는 것을 그림 7과 8에서 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 액체저장탱크, 콘크리트담과 같은 다른 유체-구조물 상호작용계에서 공통적으로 관찰되는 특징 중 하나이다.^{(5),(6),(19),(20)}

6.2 지반의 유연성의 영향

지반의 유연성이 구조물의 응답에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 지반이 유연한 경우(FSSI)와 그렇지 않은 경우(FSI)에 대해서 지진응답을 계산하여 비교하였다. 유연한 지반의 전단파 속도는 270m/s로 가정하였고, SV 지진파가 수직으로 입사한다고 가정하였다. Tower 최상단의 가속도를 계산하여 그림 9a에는 전달함수를 그림 9b에는 시간이력을 비교하였다. 진동수 응답 특성이 지반-구조물의 상호작용에 의해서 장주기 영역으로 이동하고 진폭이 증가하는 것을 그림 9에서 확인할 수 있다.

Tower를 설계할 때는 전단력과 휨모멘트의 최대값을 알 필요가 있다. 그림 10에는 Tower 밑면에서의 전단력의 진동수 응답과 시간이력을 도시하였고 그림 11에는 Tower 밑면에서의 전도모멘트의 진동수 응답과 시간이력을 제공하였다. 지반-구조물 상호작용이 요구 설계력을 크게 증가시

(a) 전달함수

(b) 시간이력

〈그림 9〉 Tower 최상단 가속도

(a) 전달함수

(b) 시간이력

〈그림 10〉 Tower 밑면에서의 전단력

킬 수 있다는 중요한 현상을 확인할 수 있다.

기초와 지반의 설계에 있어서는 기초 저면에 작용하는 전단력과 전도모멘트를 알아야 할 필요가 있다. 이 전단력과 전도 모멘트는 Tower의 밑면에서의 값들과는 다를 수 있다. 그림 12과 13에는 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우에

(a) 전달함수

(b) 시간이력

〈그림 11〉 Tower 밑면에서의 전도모멘트

(a) 전달함수

(b) 시간이력

〈그림 13〉 Footing 밑면에서의 전도모멘트

(a) 전달함수

(b) 시간이력

〈그림 12〉 Footing 밑면에서의 전단력

있어서 전단력과 전도모멘트를 계산하여 도시하였다. Footing 이 전도모멘트에 미치는 영향이 상당함을 그림들은 보여주고 있다.

이 예제에서는 표면확대기초를 가정하였고 지반도 상대적으로 연약하다고 가정하였다. 만약 파일 기초를 사용하거

나 지반이 단단하다면 지반-구조물 상호작용의 영향이 이 예제에서 보다 정도가 작을 수 있다. 그럼에도 불구하고 예제 결과는 지반-구조물 상호작용이 해상풍력발전기와 같은 구조물의 동적 거동 해석 시 고려되어야 할 중요 인자라는 것은 확인시켜주고 있다.

7. 결론

이 연구에서는 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 해상 풍력 발전기의 지진응답 해석기법을 개발하였다. 이 방법에서 상부구조의 유연성, 상부구조와 해수와의 동적 상호작용, 기초에서 유연한 지반과의 상호작용이 고려되었으며, Rayleigh-Ritz 방법과 부분구조법에 근거하였다. 이 방법은 더욱 일반적인 형식의 풍력발전기 구조와 비균질 지반과 및 기초 모델에도 쉽게 확장하여 적용할 수 있다. 적용 예제에서 해석 기법의 타당성을 검증하였고 유체-구조물 상호작용, 구조물-지반 상호작용이 풍력발전기의 지진응답에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 제안한 해석법을 사용해서 동적 특성을 파악할 수 있을 뿐 아니라 밑면 전단력과 전도모멘트와 같은 설계에 필요한 응답치를 얻을 수 있다는 것을 보여 주었다.

유체-구조물 상호작용은 고유주기와 동수압의 크기 및 분포에 변화를 가져오며, 특히 상단 가속도와 전도모멘트를

증가시킬 수 있다. 지반-구조물 상호작용은 지반이 연약한 경우 고유주기를 장주기 영역으로 이동시키고 응답의 크기를 대폭 증가시킬 수 있다. 주기의 이동은 유체-구조물-지반 연성계에 대해서는 장주기 특성의 풍하중과 파랑하중의 영향이 증대될 수 있는 가능성을 시사하고 있다. 기초의 rocking으로 인해서 밑면에 대한 상단의 상대변위는 대폭 증폭될 수 있고 이는 stability 저하로 이어질 수 있다.

이 연구의 결과는 제안된 방법이 타당하고 유용함을 입증하고 있다. 비록 확장성은 있다고 할지라도 다양한 조건과 하중 상태에서 해상풍력발전기의 지진응답 평가를 가능하게 하기 위해서는 후속 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업 (08기술혁신E01)에 의하여 부분적으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사 드립니다. 또한, 본 연구는 서울대학교 건설환경종합연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. Spera, D.A., *Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, 2nd Edition, ASME Press, Three Park Avenue, New York, New York, 2009.
2. 김기두, 최동호, 심종성, 김경철, “해상풍력 지지구조물의 개발 및 설계”, 대한토목학회지, 제59권, 제5호, 28-37, 2011.
3. 신윤섭, 박중현, 이영남, “해상풍력 시장 및 요소 기술”, 대한토목학회지, 제59권, 제9호, 26-30, 2011.
4. 고광오, 정광희, 이종세, 윤성범, “해양에너지 복합발전단지 개발의 필요성과 방안”, 대한토목학회지, 제59권, 제12호, 29-36, 2011.
5. NRC, *Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance and Research Needs*, National Academy Press, 1990.
6. Rammerstorfer, F. G., Sharf, K., and Fisher, F. D., “Storage Tanks under Earthquake Loading,” *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 43, 261-282, 1990.
7. Wilson, J.F., *Dynamics of Offshore Structures*, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.
8. Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., Witt, R.J., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., 2002.
9. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2006.
10. Fung, Y.C., *A First Course in Continuum Mechanics*, 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1994.
11. Malvern, L.E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1969.
12. Abramowitz, A., Stegun, I.A., *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, Dover Publications, Inc., New York, 1972.
13. Chopra, A.K., “Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes,” *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 93, No. EM6, 205-223, 1967.
14. Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. and Shiomi, T., *Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering*, John Wiley, New York, 1999.
15. Kausel, E., *Forced vibrations of circular foundations on layered media*, Research Report R74-11, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1974.
16. Wolf, J.P., *Dynamic soil-structure interaction*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
17. Lee, J.H., Kim, J.K., and Tassoulas, J.L., “Dynamic analysis of foundations in a layered half-space using a consistent transmitting boundary,” *Earthquakes and Structures* (accepted).
18. 이진호, 김재관, 류정수, “ $u-w$ 정식화에 근거한 지하수로 포화된 가로등방성 층상지반에서의 3차원 전달경계”, 한국지진공학회 논문집, 제13권, 제6호, 67-86, 2009.
19. 김재관, 이진호, 진병무, “경계요소법에 의한 이상유체의 부가 질량 및 슬러싱 강성행렬 도출과 원통형 액체저장탱크 지진응답해석”, 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제3호, 83-98, 2000.
20. 김재관, 조정래, “전달경계를 이용한 댐-호소 계의 지진응답해석”, 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제1호, 123-131, 1999.