

해상풍력터빈의 고유진동수 예측을 위한 지반에 인입된 파일의 연속체 지반 모델 기반 수평 거동 해석

An analysis of horizontal deformation of a pile in soil using a continuum soil model for the prediction of the natural frequency of offshore wind turbines

유정수,[†] 백경민,* 이종화**

(Jungsoo Ryue,[†] Kyungmin Baik,* and Jong-Hwa Lee**)

울산대학교 조선해양공학부, *한국표준과학연구원 유동음향센터, **(주)나루 이엠에스

(Received September 27, 2016; accepted November 25, 2016)

초 록: 풍력터빈의 대형화와 경량화에 따라 풍력터빈에 작용하는 동하중에 의한 진동 응답이 크게 발생할 수 있다. 특히 공진에서는 큰 진동 응답이 발생하므로 설계 시 정확한 고유진동수의 예측이 요구된다. 이를 위해 풍력터빈 지지 구조와 지반에 대한 연성해석이 요구되는데, 일반적으로 유한요소 기반 수치적인 방법이 주로 이용된다. 그러나 유한요소 해석은 파일-지반 모델링 및 연산에 많은 노력과 시간을 요구하므로 초기 설계 단계에서는 활용에 많은 제약이 따른다. 반면, 지반을 선형화한 이론 해석은 모델이 단순하고 연산 시간이 매우 짧으므로, 해석의 신뢰성이 확보된다면 지반-지지구조의 거동 특성을 초기에 예측하는데 유용한 도구가 될 수 있다. 본 논문에서는 이론 해석을 이용해 지반에 인입된 파일에 대한 파일-지반 연성해석을 수행하였다. 해석 시 지반의 변형은 탄성 범위 이내에 있다고 단순화하여 파일은 보로, 지반은 연속체로 모델링하였다. 본 연속체 모델을 이용해 파일 상단에 수평 하중 또는 모멘트가 작용할 때 발생하는 파일의 횡변형을 구하고, 파일의 세장비에 따른 영향계수를 도출하였다. 그리고 이를 유한요소해석을 기반으로 한 문헌의 결과와 비교함으로써 해석 결과의 신뢰도를 평가하였다. 이를 통해 연속체 모델의 해석은 세장비가 큰 파일에 대해서는 유효한 반면 약 3 이하의 낮은 세장비를 가지는 파일에서는 신뢰성이 떨어짐을 확인하였다.

핵심용어: 파일-지반 연성 해석, 연속체 모델, 영향계수

ABSTRACT: As wind turbines become larger and lighter, they are likely to respond sensitively by dynamic loads applied on them. Since the responses at resonances are particularly interested, it is required to be able to predict natural frequencies of wind turbines reliably at early design stage. To achieve this, the foundation-soil analysis is needed to be carried out and a finite element approach is adopted in general. However, the finite element approach would not be appropriate in early design stage because it demands heavy efforts in pile-soil modelling and computing facilities. On the contrary, theoretical approaches adopting linear approximations for soils are relatively simple and easy to handle. Therefore, they would be a useful tool in predicting a pile-soil interaction, particularly in early design stage. In this study an analysis for a pile inserted in soil is performed. The pile and soil are modelled as a beam and continuum medium, respectively, within an elastic range. In this analysis, influence factors at the pile head for lateral loads are predicted by means of this continuum approach for various length-diameter ratios of the pile. The influence factors predicted are validated with those reported in literature, proposed from a finite element analysis.

Keywords: Pile in soil coupling analysis, Continuum model, Influence coefficient

PACS numbers: 43.40.Cw, 43.20.Tb

[†]**Corresponding author:** Jungsoo Ryue (jsryue@ulsan.ac.kr)
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, 39 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Republic of Korea
(Tel: 82-52-259-2168, Fax: 82-52-259-2677)

I. 서 론

풍력터빈은 고출력을 위해 대형화 되어 가는 반면 블레이드 및 풍력타워는 비용 절감을 위해 지속적으로 경량화 되어 가고 있다. 이로 인해 풍력터빈 시스템의 강성이 낮아져 동하중에 의해 진동 응답이 크게 발생할 수 있다. 특히 동하중의 진동수가 풍력터빈 시스템의 고유진동수와 일치하게 되는 공진에서는 큰 진동 응답이 발생하므로 공진 회피를 위해 초기 설계 단계에서부터 풍력터빈 시스템의 고유진동수를 정확히 예측하는 작업이 요구된다.

고정식 풍력터빈의 경우, 하부구조물은 지반에 인입되어 지지력을 확보한다. 따라서 풍력터빈 시스템의 고유진동수를 해석하기 위해서는 지반에 설치된 풍력터빈 하부구조물에 대한 모델링이 포함되어야 한다. 그러나 풍력터빈을 단순 보 구조물로 가정하여 해석하는 경우 지반-지지구조를 보의 경계조건으로 치환할 수 있다면 해석의 편의성을 높일 수 있다.^[1] 따라서 풍력터빈 시스템의 동적 거동 해석 시 지지구조를 풍력터빈 시스템의 경계조건으로 치환하기 위해 지지구조 상단의 힘과 변위 관계를 추출하는 것이 필요하다. 즉, 지반에 인입된 파일에 대해 파일 상단의 스프링 상수를 구하여 이를 풍력터빈 시스템의 지지부 경계조건으로 활용하는 것이다.

지반에 인입된 파일은 보로, 지반은 탄성 스프링으로 가정하는 탄성지지보(*beam on spring*) 모델^[2]은 지반을 2개의 탄성 스프링(압축 및 전단 스프링)으로 가정하므로 모델링이 단순하다. Reference [3]에서는 탄성지지보 모델을 이용해, 파일의 세장비 변화에 따른 영향계수 변화를 해석하고 이를 References [4]와 [5]에 제시된 영향계수와 비교한 바 있다. 이를 통해 탄성지지보 모델의 해석 결과가 문헌에 제시된 영향계수와 유사함을 확인하였다.

그러나 탄성지지보 모델은 해석에 필요한 두 스프링 상수를 사용자가 추정하여 모델에 입력해야 한다는 단점을 가진다. 즉, 지반의 물성치로부터 지반의 탄성 스프링 상수를 사용자가 어떻게 추정할 것인가 해석 결과의 신뢰도를 좌우한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 지반을 연속체로 가정하고 지반에 유한차분 근사를 도입한 연속체 모델(*continuum*

model)이 제안되었다.^[2,6]

본 논문에서는 연속체 모델의 정식화 과정을 소개하고, 이 방법을 이용하여 지반에 인입된 파일의 세장비 변화에 따른 영향계수 변화를 해석하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 3 MW급 풍력터빈의 경우, 1차 고유진동수가 약 0.3 Hz 이하의 낮은 주파수 대역에 위치하므로 본 논문에서는 파일-지반에 대한 정적 해석을 수행하였다.^[1] 정식화한 연속체 모델을 이용해 직경이 5 m인 파일에 대해 파일 상단의 영향계수를 구하고 문헌에 제시된 영향계수와 비교하여 연속체 모델의 유효성을 검토하였다.

II. 연속체 지반 모델

Fig. 1과 같이 다층 지반에 인입된 파일에 수평하중이 작용하는 경우, 연속체 기반 모델링은 References [2]와 [6]에 제시된 정식화를 기초로 수행하였다. 다층 지반에 인입된 파일의 거동 해석 시 파일은 오일러 보로, 지반은 연속체로 모델링하고, 가상일의 원리를 적용하여 지반-지지구조 연성 해석을 위한 운동방정식을 도출한다.

Fig. 1의 파일-지반에 대해 원통좌표계를 적용하여, 파일이 인입되어 있는 지반의 수직 방향을 z 축으로 정의하였다. 파일의 길이는 L_p , 파일의 반경은 r_p 이며, 파일의 상단인 $z = 0$ 인 지점에 외부 힘 F_0 와 굽힘 모멘트 M_0 가 작용한다. 외력 힘과 모멘트는 $\theta = 0$

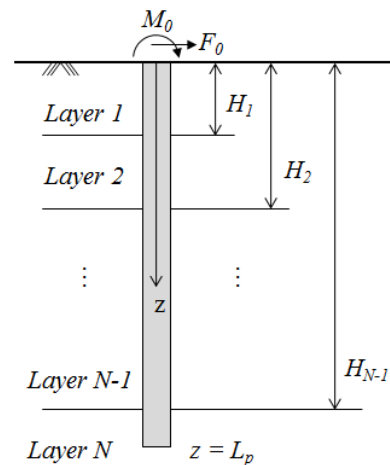


Fig. 1. Schematic diagram of a pile in a multi-layered soil.

방향으로 r 축을 따라 파일의 수평 변형을 유발한다. 지반은 N 개의 지층으로 구성되어 있으며, 지표면으로부터 임의의 i 번째 지층까지의 깊이는 H_i 이다.

Fig. 1의 모델에서 파일을 탄성보로, 지반을 연속체라고 가정하면 시스템 전체의 포텐셜 에너지는 파일과 지반의 포텐셜 에너지의 합으로 표현할 수 있다. 파일의 포텐셜 에너지 Π_p 는 Eq. (1)과 같이 파일의 굽힘에 의한 성분과 외력 힘과 모멘트에 의한 성분으로 구성된다.

$$\Pi_p = \frac{1}{2} E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right)^2 dz - F_0 w|_{0+M_0} \left. \frac{dw}{dz} \right|_0. \quad (1)$$

여기서 E_p 는 파일의 Young 계수, I_p 는 파일 단면의 2차 면적 모멘트, $w(z)$ 는 파일의 수평 변위이다.

지반의 포텐셜 에너지는 지반을 탄성체로 가정하였으므로 응력과 변형을 관계를 이용해 표현할 수 있다. $r \leq r_p$ 이며 $0 \leq z \leq L_p$ 인 영역에만 파일이 존재하므로 지반을 두 영역으로 나누면 지반의 포텐셜 에너지 Π_s 는 Eq. (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Pi_s = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_{r_p}^\infty \frac{1}{2} \sigma_{pq} \varepsilon_{pq} r dr d\theta dz + \int_{L_p}^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{r_p} \frac{1}{2} \sigma_{pq} \varepsilon_{pq} r dr d\theta dz, \quad (2)$$

여기서 σ_{pq} 는 지반의 응력 텐서(stress tensor)이며 ε_{pq} 는 변형률 텐서(strain tensor)이다.

지반의 반경 방향 변위를 $u_r(r, \theta, z)$, 원주 방향 변위를 $u_\theta(r, \theta, z)$ 라고 표시하면 지반의 변위는 Eq. (3) 그리고 Eq. (4)와 같이 변수 분리하여 표현할 수 있다.

$$u_r = w(z) f_r(r) \cos \theta, \quad (3)$$

$$u_\theta = -w(z) f_\theta(r) \sin \theta. \quad (4)$$

지반의 수직 방향 변위 u_z 는 충분히 작다고 가정하여 무시한다. Eqs. (3)과 (4)에서 사용한 지반의 반

경 방향 함수 $f_r(r)$ 과 $f_\theta(r)$ 는 파일과의 경계면인 $r = r_p$ 와 무한 거리 $r \rightarrow \infty$ 에서 Eqs. (5)와 (6)의 경계 조건을 만족해야한다.

$$f_r(r_p) = 1, \quad f_\theta(r_p) = 1, \quad (5)$$

$$f_r(\infty) = 0, \quad f_\theta(\infty) = 0. \quad (6)$$

Eq. (2)의 두 번째 항은 $r \leq r_p$ 인 구간에 대해서만 적용되므로 이 구간에서 지반의 변위는

$$u_r = w(z) \cos \theta, \quad (7)$$

$$u_\theta = -w(z) \sin \theta \quad (8)$$

로 쓸 수 있다.

원통좌표계에 대한 지반의 변위와 변형률 관계식에 Eqs. (3)과 (4), 그리고 Eqs. (7)과 (8)을 대입하고, 응력과 변형률 관계식 $\sigma_{pq} = \lambda \delta_{pq} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}$ 을 적용한다. 여기서 λ 와 μ 는 각각 1차와 2차 Lamé 상수, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 변위-변형률과 응력-변형률 관계식을 적용하여 정리한 파일과 지반의 전체 포텐셜 에너지 Π 는 Eq. (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right)^2 dz - F_0 w|_{0+M_0} \left. \frac{dw}{dz} \right|_0 \\ & + \int_0^\infty \int_{r_p}^\infty \left[\frac{\pi \lambda w^2}{2} \left(\frac{df_r}{dr} + \frac{f_r - f_\theta}{r} \right)^2 \right. \\ & + \pi \mu w^2 \left(\frac{df_r}{dr} \right)^2 + \pi \mu \frac{w^2}{r^2} (f_r - f_\theta)^2 \\ & + \left. \frac{\pi \mu w^2}{2} \left(\frac{f_r - f_\theta}{r} + \frac{df_\theta}{dr} \right)^2 \right] r dr dz \\ & + \frac{\pi \mu}{2} \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 (f_r^2 + f_\theta^2) r dr dz + \pi \mu r_p^2 \int_{L_p}^\infty \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz. \quad (9) \end{aligned}$$

Eq. (9)의 포텐셜 에너지에 가상일의 원리에 따라 $\delta \Pi = 0$ 을 적용하면 Eq. (10)을 얻는다.

$$\delta \Pi = E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) dz - F_0 \delta w|_{0+M_0} + M_0 \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) \Big|_0$$

$$\begin{aligned}
 & + \pi \int_0^\infty \int_{r_p}^\infty \left[\lambda \left(\frac{df_r}{dr} + \frac{f_r - f_\theta}{r} \right)^2 \right] w \delta w \\
 & + 2\mu \left(\frac{df_r}{dr} \right)^2 w \delta w + \frac{2\mu}{r^2} (f_r - f_\theta)^2 w \delta w \\
 & + \mu \left(\frac{f_r - f_\theta}{r} + \frac{df_\theta}{dr} \right)^2 w \delta w \\
 & + \mu \frac{dw}{dz} \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) (f_r^2 + f_\theta^2) r dr dz \\
 & + \pi \int_0^\infty \int_{r_p}^\infty \left[\lambda w^2 \left(\frac{df_r}{dr} + \frac{f_r - f_\theta}{r} \right) \delta \left(\frac{df_r}{dr} \right) \right. \\
 & + \lambda w^2 \left(\frac{df_r}{dr} + \frac{f_r - f_\theta}{r} \right) \left(\frac{\delta f_r - \delta f_\theta}{r} \right) + 2\mu w^2 \left(\frac{df_r}{dr} \right) \delta \left(\frac{df_r}{dr} \right) \\
 & + 2\mu \frac{w^2}{r^2} (f_r - f_\theta) (\delta f_r - \delta f_\theta) \\
 & + \mu w^2 \left(\frac{f_r - f_\theta}{r} + \frac{df_\theta}{dr} \right) \left(\frac{\delta f_r - \delta f_\theta}{r} \right) \\
 & + \mu w^2 \left(\frac{f_r - f_\theta}{r} + \frac{df_\theta}{dr} \right) \delta \left(\frac{df_\theta}{dr} \right) \\
 & + \mu \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 (f_r \delta f_r + f_\theta \delta f_\theta \\
 & \left. + \pi \mu r_p^2 \int_{L_p}^\infty \left(\frac{dw}{dz} \right) \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) dz = 0. \right. \tag{10}
 \end{aligned}$$

Eq. (10)의 첫 번째 적분항을 부분적분하면

$$\begin{aligned}
 & E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) dz \\
 & = E_p I_p \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) \Big|_0^{L_p} - E_p I_p \left(\frac{d^3 w}{dz^3} \right) \delta w \Big|_0^{L_p} \\
 & + E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^4 w}{dz^4} \right) \delta w dz \tag{11}
 \end{aligned}$$

으로 표현된다. Eq. (10)의 나머지 적분항에 대해서도 부분적분을 수행하고, 변분 δw , $\delta(dw/dz)$, δf_r 그리고 δf_θ 를 가진 항들을 모아 간략히 정리하면 Eq. (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \delta \Pi = & E_p I_p \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) \Big|_0^{L_p} - E_p I_p \left(\frac{d^3 w}{dz^3} \right) \delta w \Big|_0^{L_p} \\
 & + E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^4 w}{dz^4} \right) \delta w dz - F_0 \delta w \Big|_0 + M_0 \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) \Big|_0 \\
 & + \int_0^\infty \left[k w - \pi \mu r_p^2 \frac{d^2 w}{dz^2} (\xi_1 + \xi_2) \right] dz \delta w
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \pi \mu r_p^2 \frac{d^2 w}{dz^2} (\xi_1 + \xi_2) \left(\frac{dw}{dz} \right) \delta w \Big|_0^\infty \\
 & - \int_{r_p}^\infty \left[\beta_1 \left(r \frac{d^2 f_r}{dr^2} + \frac{df_r}{dr} \right) - (\beta_3 + \beta_2) \frac{df_\theta}{dr} \right. \\
 & \left. - \frac{\beta_4}{r} (f_r - f_\theta) - n_s r f_r \right] \delta f_r dr \\
 & - \int_{r_p}^\infty \left[\beta_2 \left(r \frac{d^2 f_\theta}{dr^2} + \frac{df_\theta}{dr} \right) + (\beta_3 + \beta_2) \frac{df_r}{dr} \right. \\
 & \left. + \frac{\beta_4}{r} (f_r - f_\theta) - n_s r f_\theta \right] \delta f_\theta dr \\
 & + \beta_2 r \frac{df_\theta}{dr} \delta f_\theta \Big|_{r_p}^\infty + \beta_2 (f_r - f_\theta) \delta f_\theta \Big|_{r_p}^\infty \\
 & - \pi \mu r_p^2 \int_{L_p}^\infty \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta w dz + \pi \mu r_p^2 \left(\frac{dw}{dz} \right) \delta w \Big|_{L_p}^\infty = 0. \tag{12}
 \end{aligned}$$

Eq. (12)에 도입된 파라미터 β , η , n_s , ξ 그리고 k 의 식들은 부록의 Eqs. (A-1) ~ (A-5)에 수록하였다.

2.1 파일의 운동방정식

Eq. (12)에서 파일의 가상 변위 δw 와 $\delta(dw/dz)$ 를 가진 항들에 대해 가상일의 원리를 적용하면

$$\begin{aligned}
 & E_p I_p \int_0^{L_p} \left(\frac{d^4 w}{dz^4} \right) \delta w dz - \pi \mu r_p^2 \int_{L_p}^\infty \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta w dz \\
 & + \int_0^\infty \left[k w - \pi \mu r_p^2 \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) (\xi_1 + \xi_2) \right] \delta w dz \\
 & = 0, \tag{13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - E_p I_p \left(\frac{d^3 w}{dz^3} \right) \delta w \Big|_0^{L_p} + \pi \mu r_p^2 \left(\frac{dw}{dz} \right) \delta w \Big|_{L_p}^\infty - F_0 \delta w \Big|_0 \\
 & + \pi \mu r_p^2 (\xi_1 + \xi_2) \left(\frac{dw}{dz} \right) \delta w \Big|_0^\infty = 0, \tag{14}
 \end{aligned}$$

$$E_p I_p \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right) \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) \Big|_0^{L_p} + M_0 \delta \left(\frac{dw}{dz} \right) \Big|_0 = 0 \tag{15}$$

를 얻는다. 각 지층별 파일에 대해서도 가상일의 원리가 적용되어야하므로, $H_{i-1} \leq z \leq H_i$ 에 위치한 i 번째 지층의 파일에 대해 Eq. (13)을 적용하면

$$\int_{H_{i-1}}^{H_i} \left[E_p I_p \left(\frac{d^4 w_i}{dz^4} \right) - 2t_i \left(\frac{d^2 w_i}{dz^2} \right) + k_i w_i \right] \delta w_i dz = 0 \tag{16}$$

이며, $t_i = \frac{\pi}{2} \mu r_p^2 (\xi_1 + \xi_2)$ 이다. 임의의 변분 δw 에 대해 Eq. (16)의 적분이 항상 0이 되어야 하므로, i 번째 지층에 놓인 파일의 변위 $w_i(z)$ 에 대한 운동방정식은 Eq. (17)와 같다.

$$E_p I_p \left(\frac{d^4 w_i}{dz^4} \right) - 2t_i \left(\frac{d^2 w_i}{dz^2} \right) + k_i w_i = 0, \quad (17)$$

한편 Eq. (13)을 $L_p \leq z \leq \infty$ 인 파일 아래의 지반에 대해 적용하면 $w_{N+1}(z)$ 에 대한 운동방정식

$$k_N w_{N+1} - 2t_{N+1} \left(\frac{d^2 w_{N+1}}{dz^2} \right) = 0 \quad (18)$$

을 얻는다. 여기서 $t_{N+1} = \frac{\pi}{2} \mu r_p^2 (\xi_1 + \xi_2 + 1)$ 이다. Eq. (18)의 해 $w_{N+1}(z)$ 는 $z = L_p$ 와 $z \rightarrow \infty$ 인 두 끝단에서 각각 $w_{N+1}(L_p) = w_N(L_p)$ 그리고 $w_{N+1}(\infty) = 0$ 이라는 경계 조건을 만족해야한다. 위 두 경계 조건을 만족하는 Eq. (18)의 해를 구하면

$$w_{N+1}(z) = w_N(L_p) e^{-\sqrt{\frac{k_N}{2t_{N+1}}}(z-L_p)} \quad (19)$$

이다.

각 지층별로 Eqs. (14)와(15)를 적용하면 각 지층별 파일의 경계 조건을 얻을 수 있다. 두 지층의 i 번째 경계인 $z = H_i$ 에서는

$$\begin{aligned} -E_p I_p \left(\frac{d^3 w_i}{dz^3} \right)_{H_i} + 2t_i \left(\frac{dw_i}{dz} \right)_{H_i} \\ = -E_p I_p \left(\frac{d^3 w_{i+1}}{dz^3} \right)_{H_i} + 2t_i \left(\frac{dw_{i+1}}{dz} \right)_{H_i}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\left(\frac{d^2 w_i}{dz^2} \right)_{H_i} = \left(\frac{d^2 w_{i+1}}{dz^2} \right)_{H_i} \quad (21)$$

가 되며, 파일의 상단 $z = 0$ 에서는

$$E_p I_p \left(\frac{d^3 w_1}{dz^3} \right)_0 - 2t_1 \left(\frac{dw_1}{dz} \right)_0 - F_0 = 0, \quad (22)$$

$$E_p I_p \left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right)_0 + M_0 = 0. \quad (23)$$

그리고 파일의 끝단 $z = L_p$ 에서는

$$-E_p I_p \left(\frac{d^3 w_N}{dz^3} \right)_{L_p} + 2t_N \left(\frac{dw_N}{dz} \right)_{L_p} = 2t_{N+1} \left(\frac{dw_{N+1}}{dz} \right)_{L_p}, \quad (24)$$

$$\left(\frac{d^2 w}{dz^2} \right)_{L_p} = 0 \quad (25)$$

의 조건을 얻는다.

2.2 지반의 운동방정식

Eq. (12)에서 지반 변위 함수의 변분 δf_r 과 δf_θ 에 대해 가상일의 원리를 적용하면

$$\frac{d^2 f_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df_r}{dr} - \left(\frac{\gamma_1^2}{r^2} + \frac{\gamma_2^2}{r_p^2} \right) f_r = \frac{\gamma_3^2}{r} \frac{df_\theta}{dr} - \frac{\gamma_1^2}{r^2} f_\theta, \quad (26)$$

$$\frac{d^2 f_\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df_\theta}{dr} - \left(\frac{\gamma_4^2}{r^2} + \frac{\gamma_5^2}{r_p^2} \right) f_\theta = -\frac{\gamma_6^2}{r} \frac{df_r}{dr} - \frac{\gamma_4^2}{r^2} f_r \quad (27)$$

를 얻는다. Eqs. (26)과(27)에 사용된 기호 γ_i 의 정의는 부록의 Eq. (A-6)에 수록하였다. Eqs. (26)과(27)은 f_r 과 f_θ 가 등호 좌변과 우변에서 서로 연성되어 있어 대수적으로 풀리지 않는다. 따라서 지반의 변위 함수는 수치해석 기법인 유한차분법을 도입해 해가 수렴할 때까지 반복연산을 수행하여 구한다.

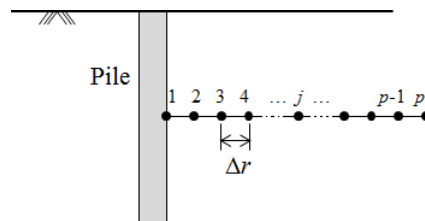


Fig. 2. A finite difference model for a soil along the radial direction.

Fig. 2와 같이 지반을 반경 방향으로 p 개의 절점을 갖도록 이산화 하여 유한차분 근사를 적용하면 Eqs. (26)과 (27)을 이산화 방정식으로 표현할 수 있다. 여기에 Eqs. (5)와 (6)의 경계 조건을 적용하여 행렬 형태로 표현하면

$$\mathbf{R} \mathbf{f}_r = \mathbf{T}_r, \tag{28}$$

$$\mathbf{T} \mathbf{f}_\theta = \mathbf{R}_\theta \tag{29}$$

로 쓸 수 있다. 여기서 지반 함수 벡터 \mathbf{f}_r 과 \mathbf{f}_θ 는

$$\mathbf{f}_r = [f_{r,1} \ f_{r,2} \ f_{r,3} \ \dots \ f_{r,p}]^T, \tag{30}$$

$$\mathbf{f}_\theta = [f_{\theta,1} \ f_{\theta,2} \ f_{\theta,3} \ \dots \ f_{\theta,p}]^T, \tag{31}$$

이며 상첨자 T 는 전치(transpose)를 의미한다. 행렬 \mathbf{R} 과 \mathbf{T} 그리고 벡터 \mathbf{T}_r 과 \mathbf{R}_θ 의 구성은 부록의 Eqs. (A-7)~(A-10)에 나타내었다. Eqs. (28)과 (29)의 이산화 운동방정식은 반복연산을 통해 수렴해 \mathbf{f}_r 과 \mathbf{f}_θ 를 얻을 수 있다.

2.3 파일과 지반 연성 해석

파일과 지반에 대해 Eqs. (17), (28) 그리고 (29)의 운동방정식을 도출하였으므로 위 세 식을 풀어 파일과 지반의 변위를 구할 수 있다.

Eq. (17)로부터 파일의 변위를 구하기 위해서는 지반에 대한 강성 파라미터 k_i 와 t_i 를 알아야 한다. k_i 와 t_i 는 f_r 과 f_θ 의 함수이므로 Eqs. (28)와 (29)로부터 f_r 과 f_θ 를 먼저 구해야 한다. 그러나 f_r 과 f_θ 는 파일의 변위로부터 계산되는 β_2, β_3 그리고 n_s 가 필요하다. 결국 파일 변위와 지반 변위가 서로 연성되어 있기에 이들을 연립방정식으로 구성할 수 없다.

따라서 파일의 변위와 지반의 변위를 구하기 위해 입력 파라미터의 초기값을 임의로 추정 후 반복연산을 통해 수렴해를 찾아야 한다. 즉, 세 파라미터 β_2, β_3 , 그리고 n_s 또는 γ_i 중 세 개를 초기 입력변수로 두고 지반과 파일의 변위에 대해 반복 연산을 수행하여 이 세 파라미터가 수렴값을 가질 때의 파일 및 지

반 변위를 최종 해로 취한다.

III. 세장비에 따른 파일의 영향계수

본 절에서는 II장에서 정식화한 연속체 모델을 이용해 파일의 세장비변화에 따른 파일 상단의 영향계수 변화를 해석하였다. 연속체 모델에서 얻어진 영향계수는 참고문헌에 제시된 **Randolf**의 영향계수^[4,5]와 비교하여 해석 결과의 유효성을 검토하였다.

3.1 영향계수

직경이 d_p , 길이가 L_p 인 파일의 상단에 하중 또는 모멘트가 작용할 때 발생하는 파일 상단의 변위와 기울기는 영향계수를 이용해 표현할 수 있다. 풍력터빈의 경우 풍력타워의 높이로 인해 지구구조에 모멘트가 크게 작용하므로 모멘트에 의해 발생하는 영향계수에 대해서만 기술하였다.

Reference [5]에 따르면, 강성 E_c 를 갖는 파일의 변형은 파일의 세장비 L_p/d_p 와 파일-지반의 강성비 E_c/G_s^* 에 따라 세 개의 구간으로 나눌 수 있다. 여기서 G_s^* 는 지반의 전단강성 G_s 와 Poisson비 ν 를 이용해 $G_s^* = G_s(1+3\nu)/4$ 로 정의된다.

먼저, $L_p/d_p < 0.05(E_c/G_s^*)^{1/2}$ 인 구간에서는 파일이 지반 속에서 강체처럼 거동을 하며, 이 때 영향계수는

$$c_{uM} = 0.3 \left(\frac{2L_p}{d_p} \right)^{-7/8}, \quad c_{\theta M} = 0.8 \left(\frac{2L_p}{d_p} \right)^{-5/3} \tag{32}$$

로 근사화할 수 있다. 여기서 영향계수의 첫 번째 하첨자는 변위 혹은 기울기를, 두 번째 하첨자는 모멘트를 의미한다. Eq. (32)의 영향계수는 지반의 강성과는 무관하며 세장비만의 함수이다. 반면 $L_p/d_p > (E_c/G_s^*)^{2/7}$ 인 구간에서는 파일이 탄성 보 거동을 하며, 영향계수의 근사식은 Eq. (33)으로 근사화 된다.

$$c_{uM} = 1.08 \left(\frac{E_c}{G_s^*} \right)^{-3/7}, \quad c_{\theta M} = 6.4 \left(\frac{E_c}{G_s^*} \right)^{-5/7}. \tag{33}$$

Eq. (33)의 영향계수는 세장비에 무관하며, 지반과 파일의 강성비만의 함수로 표현되어 있다. 따라서 이 구간에서는 파일이 무한히 길다고 가정할 수 있다. 마지막으로, 위 두 구간의 사이에서는 파일이 강체와 탄성체의 중간 형태 변형을 갖는다.

Reference [5]에 제시된 Eqs. (32)와 (33)의 영향계수는 파일과 지반을 탄성체로 가정하여 수행한 유한요소 해석으로부터 도출된 근사식이다. 따라서 본 연구에서 채택한 연속체 모델의 해석 결과와 문헌에 제시된 영향계수를 비교함으로써 연속체 모델의 유효성을 검증해 볼 수 있다.

3.2 세장비에 따른 영향계수 해석

본 절에서는 연속체 모델을 이용해 파일의 세장비 변화에 따른 영향계수 변화를 구하고 Reference [5]에 제시된 Eqs. (32)와 (33)과 비교하였다. 해석에서 고려한 파일은 중심 직경 5m의 중공 파일로, 파일의 세장비는 1부터 8까지 변화시켰다. 즉, 파일의 길이 변

화는 5 m부터 40 m까지로 설정하였다. Reference [5]에 제시된 결과와 비교하기 위해 지반은 단일 지층으로 가정하였다. 또한 지반의 강성변화에 따른 영향계수 변화 특성을 파악하고자 지반의 탄성계수 E_s 를 170 MPa부터 2.7 MPa까지 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 즉, 파일과 지반의 강성비를 100부터 6400까지 변화시켰다. 해석에 사용한 파일 및 지반의 제원 및 물성치는 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 파일-지반에 대해 연속체 모델을 이용해 구한 파일 세장비 및 지반 강성 변화에 따른 영향계수는 Fig. 3에 나타내었다. 비교를 위해 Eqs. (32)와 (33)의 근사식을 얇은 점선으로 함께 도시하였다. Fig. 3에 나타난 것과 같이, 연속체 모델을 이용해 구한 영향계수가 Reference [5]의 영향계수와 전반적으로 근사한 경향 및 값을 가짐을 알 수 있다.

파일 상단에 모멘트가 작용할 때 얻어진 Fig. 3의 영향계수 c_{uM} 과 $c_{\theta M}$ 을 보면, 파일이 탄성체 거동을 보이는 세장비 구간에서는 연속체 모델의 해석 결과가 Randolph^[5]의 근사식과 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 파일이 강체거동을 보이는 낮은 세장비 구간에서는 연속체 모델의 해석결과가 Randolph^[5]의 근사식에 비해 높게 나타나고 있다. 세장비 1인 파일의 경우, c_{uM} 과 $c_{\theta M}$ 모두 Eqs. (32)와 (33)의 근사치보다 약 2배 정도 높은 결과를 보이고 있다. 영향계수가 크다는 것은 파일 상단의 응답이 크게 발생한다는 것을 의미하므로, 세장비가 낮은 파일의 경우 연

Table 1. Dimensions and principal properties of a pile and soil.

Pile outer diameter	5.025 m
Pile inner diameter	4.975 m
Pile Young's modulus E_e	8 GPa
Soil Young's modulus E_s	170 ~ 2.7 MPa
Modulus ratio E_e/G_s^*	100 ~ 6400

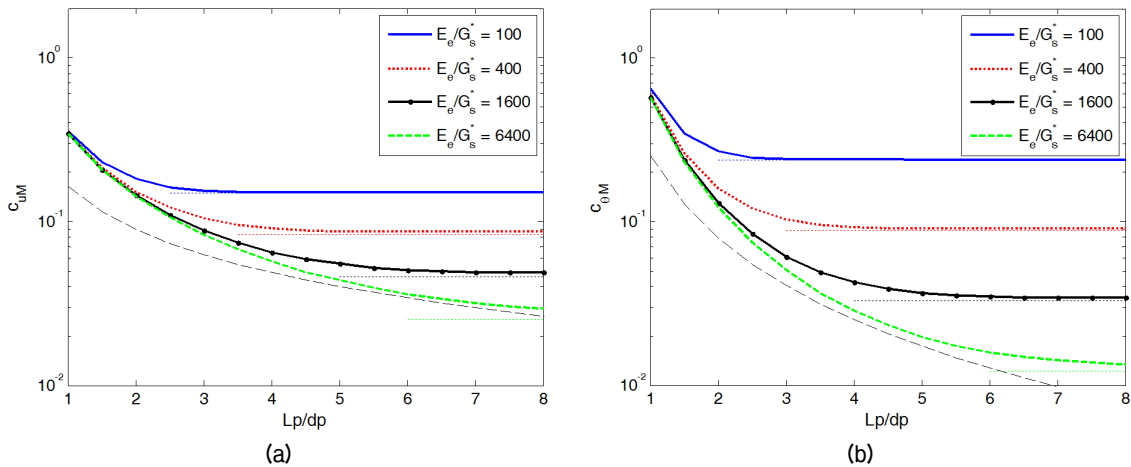


Fig. 3. Comparison of influence factors predicted by the continuum model with those in Reference [5] for a pile in Table 1. (a) c_{uM} and (b) $c_{\theta M}$ (Thin dashed line: a rigid pile approximated; thin dotted lines: flexible piles approximated).

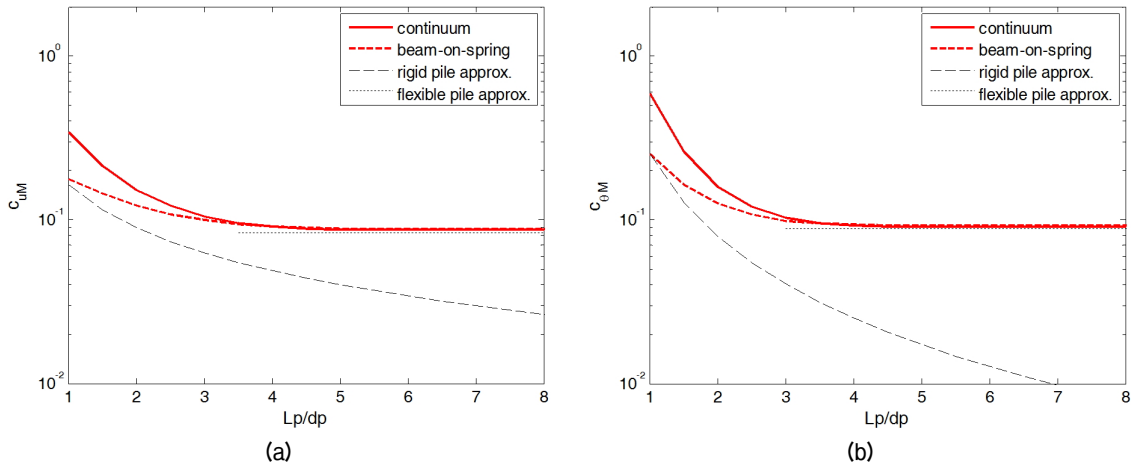


Fig. 4. Comparison of influence factors predicted by the continuum model with those from a beam-on-spring model and in Reference [6] for a pile in Table 1. (a) c_{uM} , (b) $c_{\theta M}$.

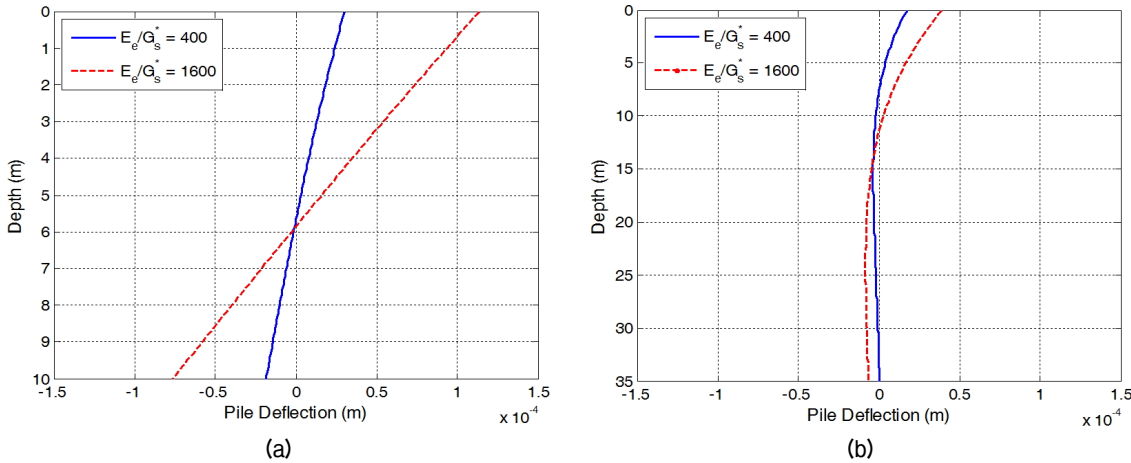


Fig. 5. Lateral pile deflections against the depth predicted by the continuum model for the pile in Table 1, induced by a moment of 100 kNm. (a) $L_p/d_p = 2$, (b) $L_p/d_p = 7$.

속체 모델을 이용해 구한 파일의 변위 또는 기울기가 유한요소해석의 결과보다 더 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4에는 Table 1의 파일과 지반에 대해 강성비 $E_p/G_s^* = 400$ 조건에서 구한 연속체 모델 해석 결과를 탄성지지보 모델^[6] 해석 결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 4를 보면, 높은 세장비 구간에서는 탄성지지보 모델과 연속체 모델 모두 유사한 결과를 주고 있다. 반면에 낮은 세장비 구간에서는 탄성지지보 모델의 해석 결과가 연속체 모델의 해석 결과보다 낮게 나타나고 있으며, 유한요소해석을 기반으로 한 Randolph의 근사식에 보다 가까운 값을 주고 있다.

그러나 Fig. 4의 결과로부터 탄성지지보 모델이 연속체 모델보다 더 정확한 방법이라고 판단하는 것은 잘못이다. 왜냐하면 탄성지지보 모델에서는 지반의 스프링 상수 k_i 와 t_i 를 임의로 추정해 주어야 하므로 Fig. 4의 해석에서도 Randolph의 결과와 유사해지는 k_i 와 t_i 를 시행착오 방법으로 찾아 입력해 주었기 때문이다. 반면 연속체 모델에서는 지반의 두 스프링 상수가 산출되므로, 연속체 모델이 탄성지지보 모델에 비해 공학적으로 유용한 방법이라 할 수 있다. 다만, Fig. 3에 나타난 것과 같이, 낮은 세장비의 파일에 대해서는 연속체 모델의 결과가 문헌의 결과와 다소 차이를 보이고 있어 이에 대한 보완이 필요할 것으

로 판단된다.

II장에서 기술한 연속체 모델의 정식화 과정을 살펴보면, 파일 하단의 경계조건으로서 Eqs. (24)와 (25)가 유도되었다. Eqs. (24)와 (25)의 경계조건에 따르면, 파일 하단에서는 전단력만 작용하며 모멘트는 작용하지 않는다. 파일의 세장비가 커서 파일이 탄성체 거동을 하는 경우, 파일 하단의 기울기는 거의 0이 되므로 지반에 의한 모멘트가 무시될 수 있다. 따라서 세장비가 큰 파일에서는 Eq. (25)의 경계조건이 유효하다. 그러나 파일의 세장비가 작아 파일이 강제 거동을 하는 경우, 파일 하단에는 상대적으로 큰 변위와 경사각이 발생하므로 Eq. (25)의 모멘트 자유 경계조건은 더 이상 유효하지 않다.

Fig. 5에는 세장비가 각각 2와 7인 두 파일에 대해 파일과 지반의 강성비가 $E_c/G_s^* = 400$ 과 1600일 때의 깊이별 파일의 변형 형태를 비교하여 나타내었다. Fig. 5(a)에는 강제 변형을 하는 세장비 2인 파일의 변형을 나타내었으며, Fig. 5(b)에는 탄성체 변형을 하는 세장비 7의 파일을 나타내었다. Fig. 5(a)로부터, 세장비가 7인 파일은 파일 하단의 경사가 거의 발생하지 않는 반면, Fig. 5(b)의 세장비가 2인 파일에서는 파일 하단의 경사각이 크게 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 세장비가 작은 파일의 경우 지반과 만나는 파일 하단에서 모멘트가 작용하도록 경계조건이 수정되어야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 지반을 탄성체로 가정한 연속체 모델을 적용하여 지반에 인입된 파일의 정적 거동 해석을 수행하였다. 해석 예로서, 균일 지반에 인입된 직경 5m의 중공 파일에 대해 상단에 수평 방향 모멘트가 작용할 때의 파일 거동을 해석하였다. 즉, 연속체 모델을 이용해 파일의 세장비 및 파일-지반 강성비 변화에 따른 파일 상단의 영향계수를 해석하고 이를 탄성지반 모델 및 문헌에 제시된 영향계수와 비교하였다.

본 해석을 통해, 약 3 이상의 높은 세장비 구간에서는 연속체 모델의 해석 결과가 탄성지반 모델 및 문헌에 제시된 영향계수와 매우 유사함을 확인하였

다. 따라서 세장비가 큰 파일의 경우, 두 개의 지반 스프링 상수가 연속체 모델로부터 신뢰성 있게 추출되고 있음을 확인하였다.

반면에 3이하의 낮은 세장비를 가진 파일에 대해서는 파일의 영향계수가 탄성지반 모델 및 유한요소 해석에 기반한 문헌의 결과보다 다소 높게 예측되었다. 연속체 모델의 해석 결과가 낮은 세장비의 파일에서 높게 예측되는 현상은 연속체 모델의 정식화 과정에서 파일 하단의 모멘트 자유 경계조건이 발생하기 때문으로 판단된다. 그러나 파일의 세장비가 작은 경우 실제로는 파일 하단에서 큰 경사각이 발생하므로 모멘트 자유 경계조건은 더 이상 유효하지 않다. 따라서 3이하의 낮은 세장비 파일에 대해 연속체 모델을 적용하기 위해서는 파일 하단의 모멘트 경계조건에 대한 수정 및 보완이 필요할 것으로 생각된다. 이에 대해서는 추후 연구를 통해 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이다. (No. 20143010024330, 실규모 해상 풍력 터빈을 탑재한 석션버켓 지지구조 실증연구)

부 록

본문의 Eq. (21)에 사용된 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \pi \int_0^\infty (\lambda + 2\mu)w^2 dz = \beta_3 + 2\beta_2, \\ \beta_2 &= \pi \int_0^\infty \mu w^2 dz, \beta_3 = \pi \int_0^\infty \lambda w^2 dz, \\ \beta_4 &= \pi \int_0^\infty (\lambda + 3\mu)w^2 dz = \beta_3 + 3\beta_2.\end{aligned}\quad (\text{A-1})$$

$$n_s = \pi \int_0^\infty \mu \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz. \quad (\text{A-2})$$

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \int_{r_p}^{\infty} \left(\frac{df_r}{dr}\right)^2 r dr, \eta_2 = \int_{r_p}^{\infty} \left(\frac{df_{\theta}}{dr}\right)^2 r dr, \\ \eta_3 &= \int_{r_p}^{\infty} f_r \left(\frac{df_r}{dr}\right) dr, \eta_4 = \int_{r_p}^{\infty} f_{\theta} \left(\frac{df_{\theta}}{dr}\right) dr, \\ \eta_5 &= \int_{r_p}^{\infty} f_{\theta} \left(\frac{df_r}{dr}\right) dr, \eta_6 = \int_{r_p}^{\infty} f_r \left(\frac{df_{\theta}}{dr}\right) dr, \\ \eta_7 &= \int_{r_p}^{\infty} \frac{f_r^2}{r} dr, \eta_8 = \int_{r_p}^{\infty} \frac{f_{\theta}^2}{r} dr, \\ \eta_9 &= \int_{r_p}^{\infty} \frac{f_r f_{\theta}}{r} dr. \end{aligned} \quad (A-3)$$

$$\xi_1 = \frac{1}{r_p^2} \int_{r_p}^{\infty} f_r^2 r dr, \xi_2 = \frac{1}{r_p^2} \int_{r_p}^{\infty} f_{\theta}^2 r dr. \quad (A-4)$$

$$k = \pi[(\lambda + 2\mu)\eta_1 + \mu\eta_2 + 2\lambda(\eta_3 - \eta_5) - 2\mu(\eta_4 - \eta_6) + (\lambda + 3\mu)(\eta_7 + \eta_8 - 2\eta_9)]. \quad (A-5)$$

본문 Eqs. (26)과 (27)에 사용된 파라미터 γ_i 의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_1^2 &= \beta_4/\beta_1, & \gamma_2^2 &= r_p^2 n_s/\beta_1, \\ \gamma_3^2 &= (\beta_2 + \beta_3)/\beta_1, & \gamma_4^2 &= \beta_4/\beta_2, \\ \gamma_5^2 &= r_p^2 n_s/\beta_2, & \gamma_6^2 &= (\beta_2 + \beta_3)/\beta_2. \end{aligned} \quad (A-6)$$

본문 Eqs. (28)과 (29)의 행렬 \mathbf{R} 과 \mathbf{T} 는

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & & & 0 \\ 0 & R_{2,2} & R_{2,3} & 0 & \dots & & \vdots \\ 0 & R_{3,2} & R_{3,3} & R_{3,4} & 0 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \dots & 0 & R_{m-2,m-3} & R_{m-2,m-2} & R_{m-2,m-1} & 0 & \\ 0 & \dots & 0 & R_{m-1,m-2} & R_{m-1,m-1} & 0 & \\ 0 & & \dots & 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & & & 0 \\ 0 & T_{2,2} & T_{2,3} & 0 & \dots & & \vdots \\ 0 & T_{3,2} & T_{3,3} & T_{3,4} & 0 & \dots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \dots & 0 & T_{m-2,m-3} & T_{m-2,m-2} & T_{m-2,m-1} & 0 & \\ 0 & \dots & 0 & T_{m-1,m-2} & T_{m-1,m-1} & 0 & \\ 0 & & \dots & 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix} \quad (A-7)$$

이며, 여기서

$$R_{i,j} = \begin{cases} \frac{1}{(\Delta r)^2} - \frac{1}{2r_i \Delta r}, & (i = j+1) \\ -\frac{2}{(\Delta r)^2} - \left[\frac{\gamma_1^2}{r_i^2} + \frac{\gamma_2^2}{r_p^2} \right], & (i = j) \\ \frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r}, & (i = j-1) \end{cases}$$

$$T_{i,j} = \begin{cases} \frac{1}{(\Delta r)^2} - \frac{1}{2r_i \Delta r}, & (i = j+1) \\ -\frac{2}{(\Delta r)^2} - \left[\frac{\gamma_4^2}{r_i^2} + \frac{\gamma_5^2}{r_p^2} \right], & (i = j) \\ \frac{1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r}, & (i = j-1) \end{cases} \quad (A-8)$$

이다. 또한 두 벡터 \mathbf{T}_r 과 \mathbf{R}_{θ} 는 Eq. (A-9)와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_r &= [1 \ T_{r,1} \ T_{r,2} \ \dots \ T_{r,m-1} \ 0]^T, \\ \mathbf{R}_{\theta} &= [1 \ R_{\theta,1} \ R_{\theta,2} \ \dots \ R_{\theta,m-1} \ 0]^T, \end{aligned} \quad (A-9)$$

여기서

$$T_{r,i} = \begin{cases} \frac{-1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{2r_2 \Delta r} + \frac{\gamma_3^2 f_{\theta,3} - 1}{r_2} - \frac{\gamma_1^2}{r_2^2} f_{\theta,2}, & (i = 2) \\ \frac{\gamma_3^2 f_{\theta,i+1} - f_{\theta,i-1}}{2\Delta r} - \frac{\gamma_1^2}{r_i^2} f_{\theta,i}, & (2 < i < m-1) \\ -\frac{\gamma_3^2 f_{\theta,m-2}}{r_{m-1}} - \frac{\gamma_1^2}{r_{m-1}^2} f_{\theta,m-1} & (i = m-1) \end{cases},$$

$$R_{\theta,i} = \begin{cases} \frac{-1}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{2r_2} \Delta r + \frac{\gamma_6^2 f_{r,3} - 1}{r_2} - \frac{\gamma_4^2}{r_2^2} f_{r,2}, & (i = 2) \\ \frac{\gamma_6^2 f_{r,i+1} - f_{r,i-1}}{2\Delta r} - \frac{\gamma_4^2}{r_i^2} f_{r,i}, & (2 < i < m-1) \\ -\frac{\gamma_6^2 f_{r,m-2}}{r_{m-1}} - \frac{\gamma_4^2}{r_{m-1}^2} f_{r,m-1} & (i = m-1) \end{cases} \quad (A-10)$$

이다.

References

1. L. B. Ibsen and M. Liingard, "Prototype bucket foundation for wind turbines - natural frequency estimation," Aalborg University (Denmark), Tech. Rep., **9**, 2006.
2. D. Basu and R. Salgado, "Elastic analysis of laterally loaded piles in multilayered soil," *Geomech. Geoen. Int. J.* **2**, 183-196 (2007).
3. D. Basu, R. Salgado, and M. Prezzi, "Analysis of laterally loaded piles in multilayered soil deposits," Purdue University (USA), Tech. Rep., FHWA/IN/JTRP-2007/23, 2008.

4. H. G. Poulos, "Behavior of laterally loaded piles I. Single piles," J. Soil Mech. Found. Div. **97**, 733-751 (1971).
5. J. P. Carter and F. H. Kulhawy, "Analysis of laterally loaded shafts in rock," J. Geotech. Eng. **118**, 839-855 (1992).
6. J. Ryue, K. Baik, and T. Kim, "An analysis of horizontal deformation of a pile in soil using a beam-on-spring model for the prediction of the eigenfrequency of the offshore wind turbine" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **35**, 261-271 (2016).

저자 약력

▶ 유 정 수 (Jungsoo Ryue)



1995년 2월: 부산대학교 기계설계공학과 학사
 1997년 2월: KAIST 기계공학과 석사
 1997년 3월 ~ 2003년 8월: 국방과학연구소 선임연구원
 2004년 12월: ISVR, Univ. of Southampton, 석사
 2007년 12월: ISVR, Univ. of Southampton, 박사
 2008년 1월 ~ 2009년 1월: ISVR, Univ. of Southampton, 연구원
 2009년 2월 ~ 현재: 울산대학교 조선해양 공학부 부교수

▶ 백 경 민 (Kyungmin Baik)



1996년 2월: 고려대학교 물리학 학사
 2000년 2월: 고려대학교 물리학 석사
 2008년 5월: WSU 물리학 박사
 2008년 7월: ISVR, U of Southampton
 2010년 7월: 우즈홀해양연구소(WHOI)
 2012년 5월 ~ 현재: 한국표준과학연구원 책임연구원

▶ 이 종 화 (Jong-Hwa Lee)



1993년 2월: KAIST 기계공학과 학사
 1995년 2월: KAIST 기계공학과 석사
 2003년 2월: KAIST 기계공학과 박사
 2003년 2월 ~ 2010년 6월: ㈜마이크로S&V 콘트롤, 연구소장
 2011년 7월 ~ 현재: ㈜나루EMS 대표