

부유식 구조물의 계류해석을 위한 계류선 강성계수의 유도

0 이 정 우¹⁾, 조 원 철²⁾

1. 서 론

파랑에 의한 부유식 구조물의 동적 거동은 질량, 폭, 흘수, 단면형상 등 구조물 자체의 인자들 뿐만 아니라, 구조물의 위치를 유지시키고 구속하는 계류선에도 영향을 받는다. 특히 구조물의 동요로 인해 계류선에 작용하는 장력은 결국 부유체에 복원력으로 작용하게 되므로 계류선의 강성은 부유식 구조물을 설계할 때 반드시 고려되어야 한다. 일반적으로 계류선의 복원력을 선형스프링으로 모형화하여 변위와 강성계수와와의 관계로 나타낸다. Jain (1980)은 평형상태의 현수방정식으로부터 계류선의 좌우 (sway) 및 상하운동 (heave) 방향의 선형강성계수를 유도하여 계류선의 단위길이당 수중무게, 길이, 상대위치, 초기장력, 계류선과 구조물 및 해저바닥과의 접촉각 등의 함수로 나타내었다. Sannasiraj 등 (1998)은 횡동요 (roll) 성분까지 고려하여 Jain (1980)의 방법을 확장하였다. 그러나, Jain (1980) 및 Sannasiraj 등 (1998)의 연구는 계류선이 팽팽하게 긴장된 조건 (taut condition)에 대한 것으로 계류선이 해저바닥과 접선방향으로 접촉된 부분이 없는 경우이다. 따라서 부유체의 작은 동요에도 급격한 장력의 증가를 유발하여 계류시스템의 안정에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 실제적으로 부유식 구조물은 계류선의 일부가 해저바닥에 닿아있는 느슨한 조건 (slack condition)인 계류시스템에 의해 구속된다. 따라서 본 연구에서는 Jain (1980)이 제시한 방법을 바탕으로 느슨한 계류선의 선형강성계수를 유도하였으며, 수치해석을 통하여 계류선의 긴장된 조건에 따른 계류선의 장력변화 및 부유식 구조물의 파랑의 감쇄 효과에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 강성계수의 유도

계류된 부유식 구조물의 파랑에 대한 동적응답 특성을 분석하기 위해서는 파동장에 놓인 부유체에 대한 경계치 문제를 풀어 속도포텐셜을 계산하는 동수역학적 해석 뿐만 아니라, 계류선의 곡선 형상, 구조물의 동요로 인한 장력 등을 산정하는 계류해석이 수반되어야 한다. 부유식 구조물의 계류해석을 위해서 일반적으로 계류선의 복원력을 선형스프링으로 모형화하며 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j = [K_j] \{X_j\}, \quad j = 1, 2, 3 \tag{1}$$

여기서 F_j 는 부유체의 운동으로 인해 계류선에 작용하는 힘, 즉 계류선의 복원력이고, X_j 는 부유체의 좌우, 상하, 횡동요로 인한 각 성분별 변위, 그리고 K_j 는 선형화된 계류선의 강성계수를 나타낸다. Jain (1980)은 팽팽한 계류선의 강성계수를 산정하였는데, 본 연구에서는 그의 방법을 확장하여 느슨한 상태의 계류선 강성계수를 유도하였다. 이를 위해서 계류선은 탄성변형을 하지 않고 횡동요 성분에 대한 굽힘 강성은 없다고 가정하였으며, 계류라인에 작용하는 항력과 해저바닥과의 마찰은 무시하였다. 그림 1은 A 점을 계류선과 부유체와의 연결점, B 점을 앵커점으로 하는 길이 L인 계류선의 2차원적인 곡선형상을 나타낸 것이다. 유도를 위한 기본 좌표계로서 B, O, O'를 원점으로 하는 3개의 좌표계 (X, Z), (x, z), 그리고 (x', z')를 설정하였다.

1) 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 02-2123-2805 (E-mail: ljw007@mail.yonsei.ac.kr)

2) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목전공 교수 02-2123-2802(E-mail: woncheol@yonsei.ac.kr)

O 점에 대한 A 점의 좌표 (x_A, z_A) 는 현수방정식 (catenary equation)으로부터 다음 식(2a)와 식(2b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_A = \frac{T_0}{w_0} \sinh^{-1} \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right), \quad (2a)$$

$$z_A = \frac{T_0}{w_0} \left[\left\{ 1 + \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right)^2 \right\}^{1/2} - 1 \right] \quad (2b)$$

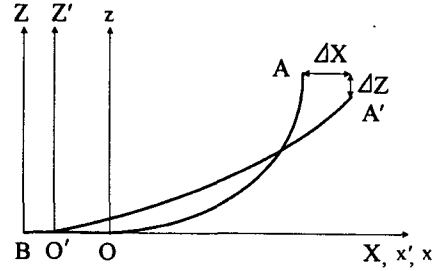


그림 1. 계류선의 기하학적 형상 및 좌표계

여기서 T_0 는 장력의 수평성분, w_0 는 단위길이당 수중무게, $L' (= L - \lambda)$ 은 계류선의 총길이 L 에서 해저바닥에 닿아있는 부분의 길이 λ (\overline{BO})을 감한 길이이다. A 점이 A' 로 ΔX 와 ΔZ 만큼 변함에 따라 원점 O 는 원점 O' ($\overline{OO'} = \overline{BO} - \overline{BO'} = \lambda - \lambda' = -\Delta\lambda$)로 이동한다. 따라서 원점 O' 에 대한 A' 점의 좌표는 $(x_A + \Delta x_A, z_A + \Delta z_A) = (x_A + \Delta X - \Delta\lambda, z_A + \Delta Z)$ 이다. 여기서 Δx_A , Δz_A 는 좌우 및 상하운동 방향 변화량이고, $\Delta\lambda$ 는 원점의 변화량으로서 길이 λ 의 변화량과 같다. A 점 위치의 변화는 길이 λ 과 수평장력 T_0 의 변화를 야기하며, Δx_A , Δz_A 를 식(2a)와 식(2b)로부터 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta x_A = \frac{dx_A}{dT_0} \Delta T_0 + \frac{dx_A}{d\lambda} \Delta\lambda = \frac{\Delta T_0}{T_0} x_A - \frac{T_0}{w_0} \left[\frac{w_0}{T_0} \Delta\lambda + \frac{w_0 L'}{T_0^2} \Delta T_0 \right] \left[1 + \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$\Delta z_A = \frac{dz_A}{dT_0} \Delta T_0 + \frac{dz_A}{d\lambda} \Delta\lambda = \frac{\Delta T_0}{T_0} z_A - L' \left[\frac{w_0}{T_0} \Delta\lambda + \frac{w_0 L'}{T_0^2} \Delta T_0 \right] \left[1 + \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (4)$$

여기서 $\Delta\lambda$ 과 ΔT_0 은 각각 λ 과 T_0 의 변화량이다. 식 (3)과 (4)를 (X, Z) 좌표계를 기준으로 다시 쓰면,

$$\Delta X = \frac{\Delta T_0}{T_0} (X_A - \lambda) - \frac{T_0}{w_0} \left[\frac{w_0}{T_0} \Delta\lambda + \frac{w_0 L'}{T_0^2} \Delta T_0 \right] \frac{T_0}{T_A} + \Delta\lambda = \frac{\Delta T_0}{T_0} (X_A - \lambda) + \left(1 - \frac{T_0}{T_A} \right) \Delta\lambda - \frac{L'}{T_A} \Delta T_0 \quad (5)$$

$$\Delta Z = \frac{\Delta T_0}{T_0} Z_A - L' \left[\frac{w_0}{T_0} \Delta\lambda + \frac{w_0 L'}{T_0^2} \Delta T_0 \right] \frac{T_0}{T_A} = \frac{\Delta T_0}{T_0} Z_A - \frac{w_0 L'}{T_A} \Delta\lambda - \frac{w_0 L'^2}{T_0 T_A} \Delta T_0 \quad (6)$$

이다. 여기서 $(X_A, Z_A) = (x_A + \lambda, z_A)$ 로서 원점 B 에 대한 A 점의 좌표이고, $\Delta X = \Delta x_A + \Delta\lambda$, $\Delta Z = \Delta z_A$ 이며, T_A 는 A 점의 초기장력으로서 다음 식(7)과 같다.

$$T_A = T_0 \left[1 + \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

상하운동 변위에 대한 좌우운동 방향 강성 K_{12} 은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$K_{12} = \frac{\Delta T_0}{\Delta Z} \quad (8)$$

$\Delta X = 0$ 으로부터 $\Delta\lambda$ 은

$$\Delta\lambda = -\left(\frac{\Delta T_0}{T_0}(X_A - \lambda) - \frac{L'\Delta T_0}{T_A}\right)\left(\frac{T_A}{T_A - T_0}\right) \quad (9)$$

이다. 식(9)를 식(6)에 대입하면,

$$\Delta Z = \frac{\Delta T_0}{T_0} \left[Z_A - \frac{w_0 L'^2}{T_A} + \frac{w_0 L'}{T_A - T_0} \left\{ (X_A - \lambda) - \frac{L'T_0}{T_A} \right\} \right] \quad (10)$$

$$K_{12} = \frac{\Delta T_0}{\Delta Z} = T_0 \left[Z_A - \frac{w_0 L'^2}{T_A} + \frac{w_0 L'}{T_A - T_0} \left\{ (X_A - \lambda) - \frac{L'T_0}{T_A} \right\} \right]^{-1} \quad (11)$$

이다. 식(2b), 식(7)과 $z_A = Z_A$ 를 이용하면,

$$Z_A - \frac{w_0 L'^2}{T_A} = -\frac{T_0}{T_A} Z_A \quad (12)$$

따라서 식(11)과 식(12)로부터 K_{12} 는 다음 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{12} = \frac{\Delta T_0}{\Delta Z} = T_0 \left[\frac{w_0 L'}{T_A - T_0} \left(X_A - \lambda - \frac{L'T_0}{T_A} \right) - \frac{T_0}{T_A} Z_A \right]^{-1} \quad (13)$$

좌우운동 변위로 인한 상하운동 방향 강성계수 K_{21} 는 아래 식(14)와 같이 정의된다.

$$K_{21} = \frac{\Delta T_v}{\Delta X} \quad (14)$$

$\Delta Z = 0$ 로부터

$$\Delta\lambda = \frac{T_A}{w_0 L'} \frac{\Delta T_0}{T_0} \left(Z_A - \frac{w_0 L'^2}{T_A} \right) = -\frac{\Delta T_0}{w_0 L'} Z_A = -\frac{\Delta T_0}{w_0 L'} \left(\frac{T_A - T_0}{w_0} \right) \quad (15)$$

위의 식(15)를 식(5)에 대입하면,

$$\Delta X = \frac{\Delta T_0}{w_0} \left[\left(\frac{T_A - T_0}{T_0 L'} \right) \left\{ \left(\frac{w_0 L'}{T_A - T_0} \right) \left(X_A - \lambda - \frac{L'T_0}{T_A} \right) - \frac{T_0}{T_A} Z_A \right\} \right] \quad (16)$$

$\Delta T_v = -w_0 \Delta\lambda$ 로부터 K_{21} 은 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{21} = T_0 \left[\frac{w_0 L'}{T_A - T_0} \left(X_A - \lambda - \frac{L'T_0}{T_A} \right) - \frac{T_0}{T_A} Z_A \right]^{-1} = K_{12} \quad (17)$$

좌우운동 변위에 의한 좌우운동 방향 강성계수 K_{11} 은 식(13)과 식(16), 그리고 $\Delta Z = 0$ 으로부터

$$K_{11} = \frac{\Delta T_0}{\Delta X} = \left(\frac{w_0 L'}{T_A - T_0} \right) K_{12} \quad (18)$$

이며, 상하운동 변위에 의한 상하운동 방향 강성계수 K_{22} 는 $\Delta X = 0$, 식(9)와 식(13)을 이용하면 식(19)와 같다.

$$K_{22} = \frac{\Delta T_v}{\Delta Z} = w_0 \frac{(-\Delta\lambda)}{\Delta Z} = w_0 \frac{(-\Delta\lambda)}{\Delta T_0} \frac{\Delta T_0}{\Delta Z} = \frac{w_0}{T_0} \left(\frac{T_A}{T_A - T_0} \right) \left(X_A - \lambda - \frac{T_0 L'}{T_A} \right) K_{12} \quad (19)$$

3. 계류조건의 영향

이중폰툰형 부유식 구조물에 대해 계류선의 긴장된 조건에 따른 계류선에 작용하는 힘의 크기와 파랑의 전달계수의 변화를 분석하였다. 부유체는 두 개의 직사각형 폰툰으로 폭 (a) 2m, 흘수 1.0m, 폰툰간격 2m이고, 수심 5m, 규칙파고 1.0m에 놓여있으며, 길이 $L=16m$ ($\lambda=8m$), 수중 중량 183 N/m인 계류선에 의해 구속된 상태이다. 본 연구에서는 상기의 경계치 문제를 Lee와 Cho (2002)의 수치모형을 이용하여 속도포텐셜을 계산하고 파랑의 전달계수를 산정하였으며, 계류선이 팽팽하게 긴장된 경우와 느슨하게 긴장된 경우에 대해서 계류력 및 파랑의 감쇄효과를 그림 2와 그림 3에서와 같이 비교하였다. 계류력은 긴장정도에 따라 강성계수의 차이로 인해 전 파수에 걸쳐 큰 차이를 보이고 있으나, 팽팽하게 긴장된 경우나 느슨하게 긴장된 경우 모두 파랑의 감쇄정도에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 이는 계류선의 강성에 의한 복원력이 구조물의 질량이나 정수압에 의한 복원력 등에 비해 훨씬 작기 때문이다.

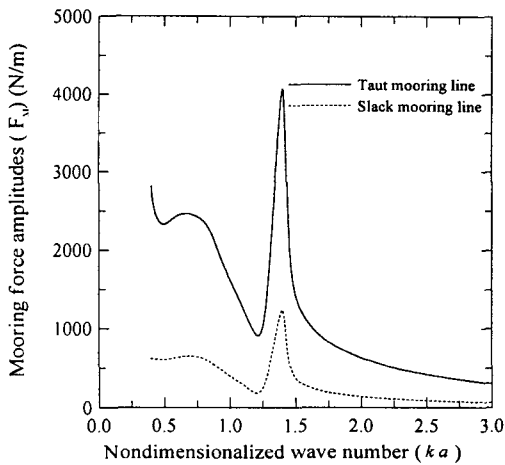


그림 2 계류조건에 따른 계류력

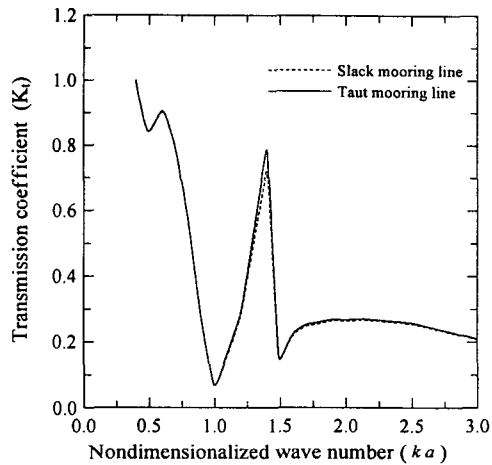


그림 3 계류조건에 따른 파랑의 전달계수

4. 결 론

본 연구에서는 계류선의 일부가 해저바닥에 닿아있는 느슨한 조건일 때의 계류선의 선형강성계수를 유도하였다. 유도된 강성계수는 양해적으로 나타내었기 때문에 부유식 구조물의 동요량을 계산하는 운동방정식에 강성행렬의 형태로 쉽게 포함될 수 있으며, 부유식 구조물의 운동으로 인한 계류력의 변화를 산정하는데도 간편하게 이용될 수 있다. 적용 예로 계류조건에 따른 계류력과 파랑의 감쇄효과를 분석한 결과, 계류력은 긴장조건에 따라 큰 편차를 보이나 계류선의 복원력이 다른 복원력 성분에 비해서 크지 않으므로 파랑의 감쇄에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

5. 참고문헌

Jain, R.K. 1980. A simple method of calculating the equivalent stiffnesses in mooring cables. *Applied Ocean Research*, 2: 139-142

Sannasiraj, S.A., Sundar, V., and Sundaravadivelu, R. 1998. Mooring forces and motion responses of pontoon-type floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 25 (1): 27-48.

Lee, J. and Cho, W. 2002. Effects of mean wave drift force on mooring tension and performance of a moored floating breakwater. *KSCE. Journal of Civil Engineering*, Vol. 6, No. 2: 193-201.