

탄성지지된 보를 이용한 초대형 부유구조물의 동적해석

Dynamic Analysis of Very Large Floating Structure Using Beams on Elastic Foundation

홍상현* · 임유빈** · 김정명*** · 이종세****

Hong, Sanghyun · Im, Yubin · Kim, Jung-Myung · Lee, Jong Seh

요약

전 세계적으로 사회기반시설 및 신재생 에너지 생산을 위한 공간부족 문제를 해결하기 위하여 초대형 부유구조물에 대한 관심이 증가하고 있다. 다양한 사용분야에 대한 안정성 확보를 위해 파랑하중에 의한 동적 응답과 부유체의 강성 대비 길이 효과로 인해 발생할 수 있는 특이 거동에 대한 분석이 필요하다. 초대형 부유구조물의 경우 중앙부에 비해 양끝 단에서 과도한 응답이 발생하며, 이를 해결하기 위해 입사파가 들어오는 초대형 부유구조물의 단부에 부착되는 다양한 감요장치(anti-motion device)가 제안되어지고 있다. 초대형 부유구조물에 감요장치가 적용될 경우 입사파에 의한 동적 과압을 감소시켜 구조물의 전반적인 응답을 줄여줄 수는 있지만 감요장치의 질량이 클 경우 오히려 끝단의 응답을 증폭시킬 수 있다. 본 논문에서는 양단 자유 경계조건의 탄성지지된 보를 이용하여 초대형 부유구조물의 길이와 끝단에 부착된 감요장치의 질량으로 인한 영향을 분석하였다.

keywords : 초대형 부유구조물, 탄성지지된 보, 감요장치, Winkler foundation

1. 서론

초대형 부유구조물(Very Large Floating Structure, VLFS)은 해상공항, 해상도시, 자원저장시설 뿐만 아니라 신재생 에너지인 풍력, 태양열, 파력 발전 시설 등 다양한 형태로 적용이 가능하며 이를 위하여 많은 연구가 진행되어지고 있다. 일반적인 선박이나 바지(barge)의 경우 길이가 짧아 강체로 해석이 가능하지만 초대형 부유구조물은 동일한 강성을 가지더라도 길이 효과로 인해 그림 1(a)와 같이 탄성거동을 하게 된다. Wang *et al.*(2010)에 따르면 파랑하중을 받는 초대형 부유구조물의 경우 중앙부에 비해 양 끝단에서 과도한 응답이 발생하며, 이를 해결하기 위하여 파랑하중을 줄여줄 수 있는 방파제뿐만 아니라 부유구조물의 끝단에 설치 될 수 있는 다양한 형태의 감요장치(anti-motion device)가 제안되어지고 있다. 이와 같은 감요장치는 입사파를 반사시키거나 산란시켜 구조물에 작용하는 파랑하중을 감소시켜 줄 수는 있지만 Tagaki *et al.*(2000)에서 제안된 그림 1(b)와 같은 박스 형태의 감요장치는 부유구조물의 끝단에 추가적인 질량으로 작용하여 끝단의 응답을 증폭시킬 수 있다. 본 연구에서는 초대형 부유구조물을 탄성지지된 보로 가정하고 감

* 학생회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 jerom1st@hanyang.ac.kr

** 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 pistil3@hanyang.ac.kr

*** 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 liquors@hanyang.ac.kr

**** 정희원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 jonglee@hanyang.ac.kr

요장치의 질량을 한 쪽 끝단에 경계조건으로 주어 구조물의 길이와 경계조건에 따른 동적특성을 분석하였다. 이와 더불어 파랑하중을 지속적으로 받고 있는 정상상태의 응답을 통해 길이와 감요장치의 질량에 따른 영향을 분석하였으며, 구조물의 변형과 유체유동의 상호작용으로 인한 유탄성 응답은 고려하지 않았다.

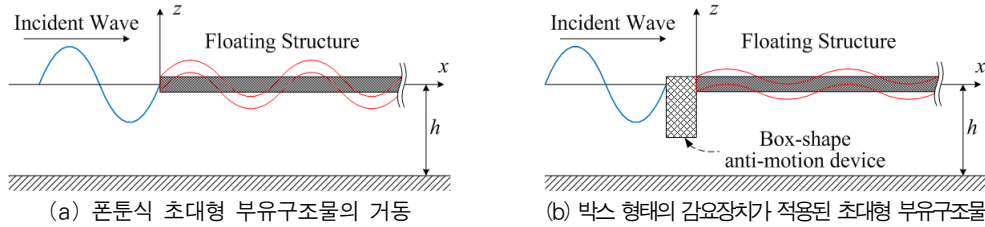


그림 1 초대형 부유구조물의 감요장치(anti-motion device)

2. 초대형 부유구조물의 탄성지지된 보 모델링

초대형 부유구조물은 길이에 비해 두께가 매우 얇아 전단의 영향을 무시할 수 있으므로 파라하중에 의한 상하응답(heave motion)을 확인하기 위하여 아래의 식과 같이 Euler-Bernoulli 보로 모델링 하였다.

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} = P(x, t) \quad (1)$$

보에 작용하는 하중은 선형파랑으로 가정하여 아래와 같이 선형 Bernoulli 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_w} + gz = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 초대형 부유구조물은 물의 정수압($k_w = \rho_w g$)에 의해 지지되며, 선형파랑의 속도퍼텐셜(Φ)로 구성된 동적압력(P_d)을 받는 유한한 길이(L)의 탄성지지된 보로서 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다 (그림 2(a)).

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} + k_w w = P_d(x, t) \quad \text{where, } P_d(x, t) = -\rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (3)$$

물의 경우 수직하중이 작용해도 지반과 같이 지시스프링의 전단변형을 발생시키지 않기 때문에 식 (3)과 같이 Winker foundation (Winkler, 1867)으로 모델링할 수 있다. 감요장치가 없을 경우 보의 양 끝단은 자유경계 조건이며, 그림 2(b)와 같이 감요장치의 질량(M_0)이 $x=0$ 인 지점에 작용할 경우 경계조건은 아래와 같다.

$$(a) \quad EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = J_0 \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} \Big|_{x=0} \approx 0, \quad (b) \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Big|_{x=0} = -M_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \Big|_{x=0} \quad (4)$$

여기서 부유구조물 길이(L)에 비해 감요장치의 질량중심에 대한 질량관성 모멘트(J_0)가 작으므로 식 (4-a)와 같이 끝단에 작용하는 모멘트는 0으로 가정하였다. 비회전, 비압축성 유체로 가정된 미소진폭파의 속도퍼텐셜은 자유표면과 바닥면의 경계조건을 통해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{g \zeta_a}{\omega_0} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} \cos(\omega_0 t - k_0 x) \quad (5)$$

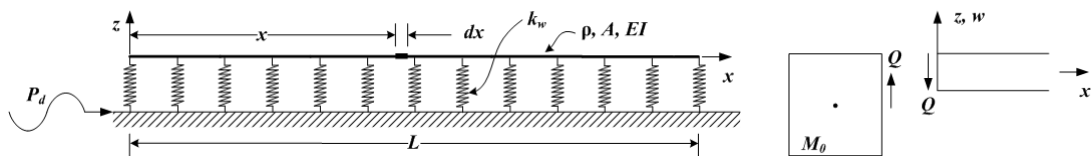


그림 2 초대형 부유구조물의 탄성지지된 보 모델링

여기서 ζ_a 는 파의 진폭을 나타내며, 파수(k_0)는 분산관계식인 $\omega_0^2 = gk_0 \tanh k_0 h$ 에 의해 결정된다. 초대형 부유구조물의 흘수 깊이(d)에서 동적압력이 가해지므로 식 (5)의 수심 z 를 d 로 대체하여 식 (3)에 대입하면 아래의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 초대형 부유구조물의 정상상태 응답은 아래의 식 (7)로 구성된다.

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} + k_w w = F \sin(\omega_0 t - k_0 x) \quad \text{where, } F = k_w \xi_a \cosh k_0 (d+h) / \cosh k_0 h \quad (6)$$

$$w_p = K(x) \cos \omega t + M(x) \sin \omega t \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 다음과 같이 $K(x)$ 와 $M(x)$ 에 관한 두 개의 상미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$(a) \quad \frac{d^4 K}{dx^4} + \left(\frac{k_w - \omega_0^2 m}{EI} \right) K = \frac{F}{EI} \sin k_0 x, \quad (b) \quad \frac{d^4 M}{dx^4} + \left(\frac{k_w - \omega_0^2 m}{EI} \right) M = -\frac{F}{EI} \cos k_0 x \quad (8)$$

정상상태 응답을 구하기 위한 식 (8)의 해는 $k_w > \omega_0^2 m$ 일 경우 아래의 식 (9)와 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$K(x) = S_1 \cosh \alpha x \cos \alpha x + S_2 \cosh \alpha x \sin \alpha x + S_3 \sinh \alpha x \cos \alpha x + S_4 \sinh \alpha x \sin \alpha x - A \sin k x \quad (9)$$

$$M(x) = C_1 \cosh \alpha x \cos \alpha x + C_2 \cosh \alpha x \sin \alpha x + C_3 \sinh \alpha x \cos \alpha x + C_4 \sinh \alpha x \sin \alpha x + A \cos k x \quad (10)$$

여기서 $\alpha = ((k_w - \omega_0^2 m)/4EI)^{1/4}$, $A = F/EI(k^4 + 4\alpha^4)$ 이며, 식 (9)와 (10)의 상수 $S_{1,2,3,4}$, $C_{1,2,3,4}$ 는 탄성지지원 보의 경계조건에 적용함으로써 결정된다. 초대형 부유구조물의 고유진동수는 식 (6)에 변수분리법을 적용하여 $\omega^2 = k^4(EI/\rho A)(1 + k_w/EIk^4)$ 로 구할 수 있으며, 파랑하중이 지속적으로 작용하고 있는 정상상태의 최대응답은 $|w_p| = (K(x)^2 + M(x)^2)^{1/2}$ 로 나타낼 수 있다.

3. 폰툰식 초대형 부유구조물의 길이와 경계조건에 따른 동적 특성

일반적인 지지형식인 폰툰식 초대형 부유구조물의 동적특성을 분석하기 위하여 Suzuki *et al.*(1996)에서 제안된 5000m의 길이를 가지는 모델 (표 1)을 사용하였으며, 길이에 대한 영향을 분석하기 위하여 500m, 1000m, 2000m의 길이를 추가적으로 적용하였다. 또한 정상상태의 응답 분석을 위해 평균수심(h) 30m, 파고 ($2\zeta_a$) 4m 조건에서 8초부터 20초까지의 파랑주기(T)를 가지는 파랑하중을 적용하였다.

양단 자유 경계조건에서 부유구조물의 길이에 따른 고유치 해석 결과 표 2와 같이 비교적 짧은 500m 일 경우 고차모드로 갈수록 고유진동수가 급격하게 증가하지만 1000m 이상일 경우에는 낮은 고유진동수를 유지하며 변위에 민감한 특성을 가지게 된다. 즉, 동일한 강성과 단위 질량을 유지하더라도 길이가 짧을수록 저차 고유진동수가 지배적이며, 강체에 가까운 거동을 나타낸다. 감요장치의 질량을 고려하기 위해 집중질량을 경계조건으로 주었을 경우 5000m에서는 고유진동수의 감소효과가 미미하였지만 상대적으로 길이가 짧은 1000m 와 500m에서는 저차모드에서 감소효과가 크게 나타났다.

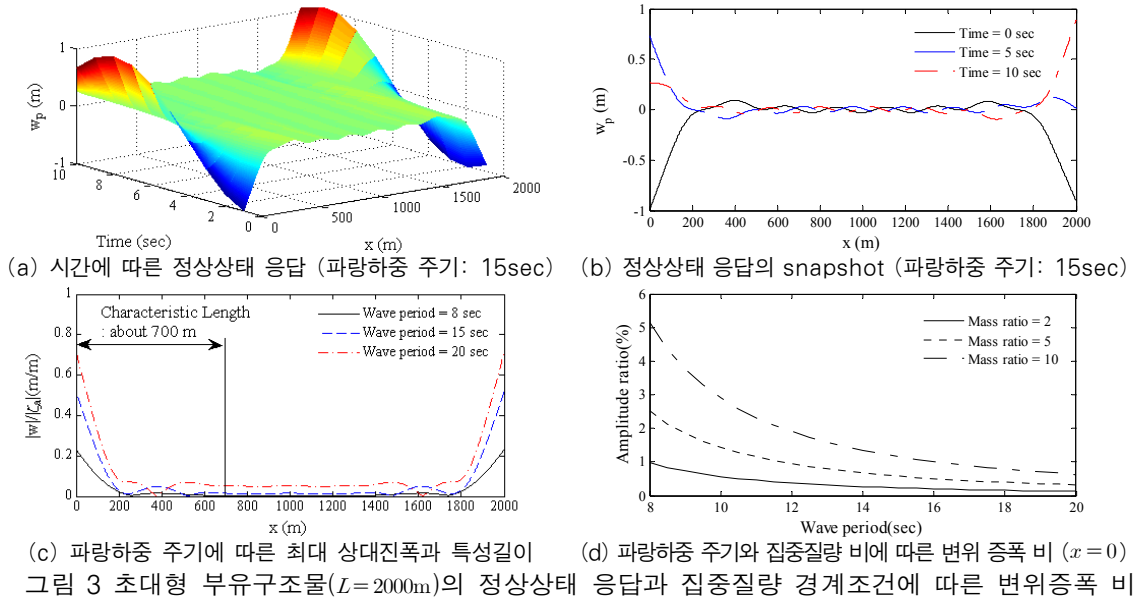
표 1 폰툰식 초대형 부유구조물 모델

구분	물성치 (단위 폭)
Bending rigidity, EI (Nm)	1.291×10^{10}
Mass per unit area, ρA (kg/m ²)	4,560
Distributed restoring spring constant, k_w (N/m ³)	9,800

표 2 길이에 따른 양단 자유 경계조건에서의 초대형 부유구조물 고유진동수와 집중질량 경계조건에 의한 고유진동수 감소율

Mode	500 m		1000 m		2000 m		5000 m	
	고유진동수 (rad/sec)	감소율 (%)	고유진동수 (rad/sec)	감소율 (%)	고유진동수 (rad/sec)	감소율 (%)	고유진동수 (rad/sec)	감소율 (%)
1	2.1016	14.329	1.5136	1.616	1.4690	0.106	1.4661	0.003
2	4.4021	16.677	1.7961	5.914	1.4888	0.523	1.4666	0.014
3	8.2683	13.309	2.5075	8.833	1.5517	1.388	1.4682	0.039
4	13.5310	10.668	3.6685	8.991	1.6899	2.562	1.4721	0.085
5	20.1474	8.835	5.2330	8.156	1.9304	3.660	1.4797	0.157
6	28.1034	7.523	7.1678	7.217	2.2860	4.370	1.4926	0.257

파랑하중에 의한 부유구조물($L=2000\text{m}$)의 동적거동은 그림 3(a)~(c)와 같이 중앙부에 비해 끝단의 특성길이 영역에서 과도한 응답이 발생한다. 하지만 부유구조물의 길이가 특성길이 보다 짧으면, 강체거동의 양상을 보이며, 양 끝단에서의 최대변위는 거의 비슷하게 발생한다. 부유구조물의 좌측 끝단에 집중질량 경계조건을 적용했을 경우 파랑하중 주기와 집중질량비에 따른 변위 증폭 비는 그림 3(d)와 같으며, 부유구조물의 길이가 달라도 유사한 증폭 비를 나타내었다. 부유구조물의 길이가 500m 일 경우에는 강체에 가까운 거동으로 인해 우측 끝단에서도 비슷한 증폭 비를 보였지만, 1000m 이상일 경우에는 증폭이 나타나지 않았다.



4. 결론

본 연구에서는 초대형 부유구조물의 길이와 경계조건에 따른 동적특성을 분석하기 위하여 탄성지지원 보로 모델링 하였으며, 지지스프링은 Winkler foundation 형태로 구성된다. 초대형 부유구조물의 경우 길이가 길어질수록 저차모드와 고차모드에 대한 고유진동수의 차이가 크지 않으며, 끝단에 집중질량이 작용하더라도 고유진동수의 감소효과가 크지 않다. 하지만 부유구조물의 길이가 길어지더라도 짧은 주기의 파랑하중이 작용할 때 부유구조물의 단위질량보다 감요장치의 질량이 10배 이상 될 경우에는 5%이상의 변위 증폭이 발생한다. 즉, 감요장치가 부유구조물에 가해지는 파랑하중을 줄여줄 수는 있지만 과도한 질량을 가질 경우 오히려 끝단의 변위를 증폭시킬 수 있으므로 주의 하여야 한다.

참고문헌

- Suzuki, H., Yoshida, K., and Iijima, K. (1996) A consideration of the structural design of a large-scale floating structure, *Journal of marine science and technology*, 1(5), pp.255~267.
- Takagi, K., Shimada, K., and Ikebuchi, T. (2000) An anti-motion device for a very large floating structure, *Marine Structures*, 13, pp.421~436.
- Wang, C.M., Tay, Z.Y., Takagi, K., and Utsunomiya, T. (2010) Literature review of methods for mitigating hydroelastic response of VLFS under wave action, *Applied Mechanics Reviews*, 63(3), pp.1~18.
- Winkler, E. (1867) *Die lehre von der elastizitat und festigkeit*, Dominicus.