

힌지를 가지는 부유식 구조물의 유탄성 거동 연구

Study on Hydroelastic Behavior of Floating Structures with Hinge Connections

조 성 필* · R. G. Giwinangun** · 윤 주 성*** · 이 필 승****
Cho, Seong-Pil · R. G. Giwinangun · Yoon, Joo-Seong · Lee, Phill-Seung

요 약

본 논문에서는 규칙 표면과의 작용하에 힌지를 가지는 부유식 평판 구조물의 유탄성 거동에 대한 연구를 수행하였다. 힌지를 가지는 부유식 구조물을 모델링하기 위해 혼합법(Mixed formulation)을 이용한 MITC 평판요소를 사용하며 정적응축기법(Static condensation method)으로 요소의 자유도를 응축시켜 힌지를 구현하였다. 또한, 유체모델은 이상유체로 가정하며 유체력 산정을 위해 Green 함수를 사용하였다. 수치해석을 통하여 힌지 개수에 따른 부유식 구조물의 굽힘모멘트의 변화를 살펴본다.

keywords : 부유식 평판 구조물, 힌지 연결, 정적 응축기법, MITC4, 유한요소법, 경계요소법

1. 서 론

최근 부유식 구조물의 대형화는 파랑에 의한 구조체의 거동해석을 위한 새로운 기술을 요구하고 있다. 대형화된 부유식 구조물은 길이에 비해 얇은 두께를 가지고 있으므로 작은 굽힘강성을 가지며 각종 파랑 및 조류, 바람과 같은 외부환경과 상호작용을 하는 탄성적 거동을 유탄성거동(Hydroelastic behavior)이라고 한다.

이에 따라 유탄성 모델에 기반을 둔 많은 연구들이 수행되어 왔다. 축소 스케일 모델을 사용하여 다양한 각도의 파랑작용 시 구조물의 유탄성 거동을 실험과 수치해석을 통하여 살펴본 연구(K. Yago, 1996), 힌지 연결을 가지는 부유식 구조물에서 힌지의 회전강성을 조절하여 유탄성 응답을 계산한 연구(S. Fu, 2007)가 있다.

힌지의 사용은 구조물의 단면 굽힘모멘트를 줄여주는 잘 알려진 방법이다. 본 연구에서는 다수의 힌지를 일정한 간격으로 배치한 부유식 구조물에서 힌지의 개수에 따라 달라지는 유탄성 거동을 연구하였다. 힌지의 개수에 따른 유탄성거동의 이해는 실제 초대형 부유식 구조물 설계에서의 필요한 기초적인 연구이다.

본 논문에서는 먼저 힌지가 없는 모델로 유탄성 해석을 수행하고 기존의 실험결과(K. Yago, 1996)로서 검증한다. 다음, 힌지로 연결된 모델에서 유탄성 해석을 수행하고 힌지의 수를 증가시켰을 때의 유탄성 거동의 경향을 살펴본다.

* 학생회원 · 한국과학기술원 해양시스템공학전공 석사과정 feels@kaist.ac.kr
** 한국과학기술원 해양시스템공학전공 석사 gusto@kaist.ac.kr
*** 한국과학기술원 해양시스템공학전공 석·박사통합과정 jooseong@kaist.ac.kr
**** 정회원 · 한국과학기술원 해양시스템공학전공 부교수 phillseung@kaist.ac.kr

2. 부유식 구조물 및 유체의 모델링과 실험을 통한 검증

2.1 부유식 구조물 및 유체의 모델링

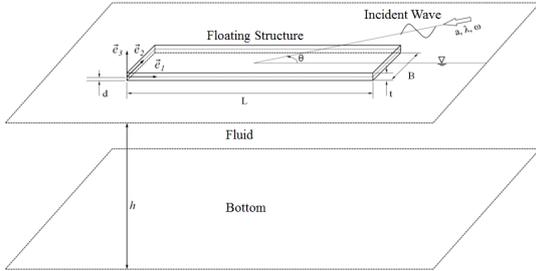


그림 1 평판요소 유탄성 해석모델

	단위	치수
길이 (L)	m	9.75
폭 (B)	m	1.95
두께 (t)	m	0.0545
흘수 (d)	m	0.0166
굽힘강성 (EI)	Nm ²	1.754 × 10 ⁴

표 1 부유식 구조물 세부사항

본 유탄성 문제 해석에 있어서 부유식 구조물은 유한요소법, 유체의 경우는 경계요소법을 이용한다. 구조물은 MITC4 평판요소로 표현되며 수학적 모델은 식(1)과 같다.

$$-\omega^2 \rho_s \int_V \delta \vec{u}^T \vec{u} dV + \int_V \delta \vec{\epsilon}^T \vec{\sigma} dV + \int_{S_B} \delta u_3 \vec{P} dS_B = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ_s 는 구조물의 밀도, ω 는 각 주파수, \vec{u} 는 변위 벡터, $\vec{\epsilon}$ 은 굽힘스트레인 벡터, $\vec{\sigma}$ 는 굽힘응력 벡터, \vec{P} 는 압력 벡터를 의미한다. 또한 u_3 은 구조물의 수직방향의 변위이며 w 로 표현되기도 한다.

평판 유한요소 내에서는 정적 응축기법으로 힌지를 모델링하였다. 구조물 내의 응축되어진 요소는 길이 또는 폭 방향으로만 회전이 가능하게 된다. 이 요소가 선으로 연결되어 힌지가 모델링 되는 것이다.

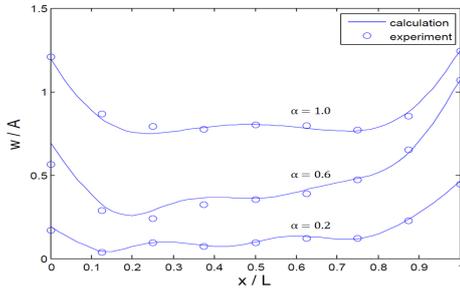
또한 유체의 수학적 모델은 Green 정리를 이용하여 식(2)로 표현된다.

$$\int_{S_B} \delta P(\vec{x})^T u_3 dS_B(\vec{x}) + \frac{1}{g \rho_w} \int_{S_B} \delta P(\vec{x})^T P(\vec{x}) dS_B(\vec{x}) + \frac{i\omega}{g} \int_{S_B} \delta P(\vec{x})^T \phi_I(\vec{x}) dS_B(\vec{x}) + \frac{\omega^2}{4\pi g^2 \rho_w} \int_{S_B} \delta P(\vec{x})^T \left(\int_{S_B} \delta P(\vec{\xi}) G(\vec{x}; \vec{\xi}) dS_B(\vec{\xi}) \right) dS_B(\vec{x}) = 0 \quad (2)$$

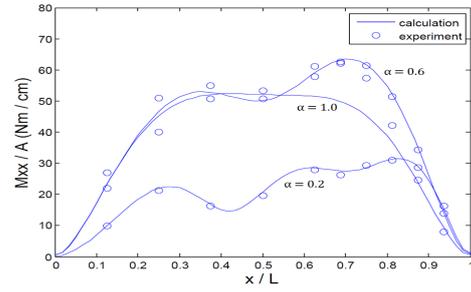
여기서 g 는 중력가속도, ρ_w 는 유체의 밀도, \vec{x} 는 공간 좌표계 벡터, $\vec{\xi}$ 는 Green 함수의 위치 벡터, G 는 Green 함수, ϕ_I 는 입사파의 포텐셜을 의미한다.

2.2 K. Yago의 실험을 통한 검증

본 논문에서는 수치해석 결과의 검증을 위하여 K. Yago(1996)의 실험모델을 사용하였다. 표 1은 Yago의 유탄성 실험모델의 세부사항이다. 그림 2는 동일한 α 값에서의 수치해석 값을 각각의 실험결과와 비교하였다. 여기서 α 는 파장의 길이(λ) / 구조물의 길이(L)을 말한다. α 는 각각 0.2, 0.6, 1.0 그리고 파 진폭(Wave amplitude)은 1cm, 입사파 각도는 0° 그리고 수심은 1.9m이다. 결과 값은 z축의 변위(w)를 파 진폭(A)으로 나눈 수직 변위의 RAO(Response Amplitude Operator)값과 구조물의 굽힘모멘트를 파 진폭으로 나눈 굽힘모멘트의 RAO 값이다. 수치해석 결과와 Yago의 실험결과가 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. Yago의 실험모델은 실제 구조물의 1/30.77 스케일을 적용한 모델로, 실제 초대형 부유식 구조물에 유탄성 거동을 상사법칙을 이용하여 계산될 수 있다.



(a) 수직 변위



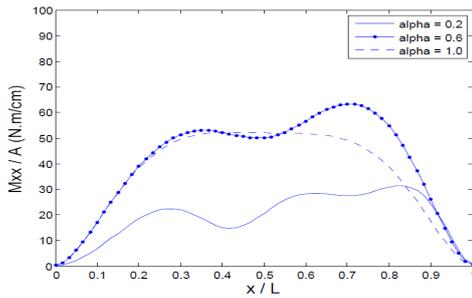
(b) 굽힘모멘트

그림 2 수직 변위 및 굽힘모멘트의 수치해석결과와 Yago실험결과와의 비교

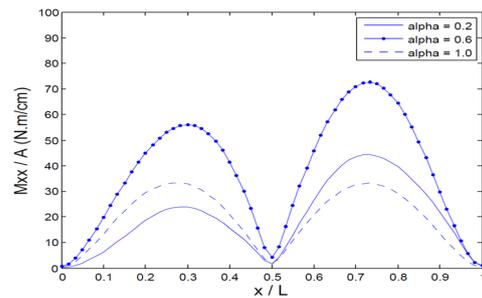
3. 해석결과의 분석

3.1 힌지 개수의 변화에 따른 모멘트의 변화

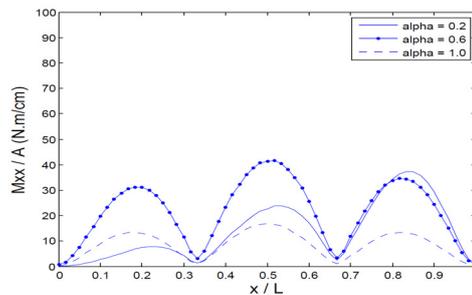
Yago의 실험모델을 기반으로 힌지가 없는 모델에서 힌지가 3개인 모델까지 평판 구조물에 작용하는 단면 굽힘모멘트의 결과를 그림 3에 나타내었다.



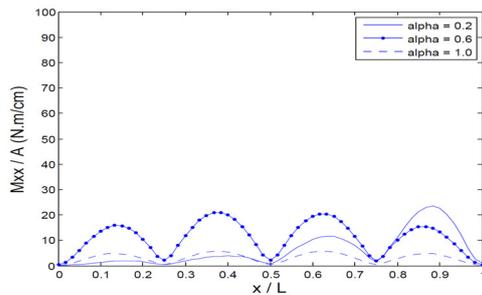
(a) No hinge connection



(b) 1 hinge connection



(c) 2 hinge connections



(d) 3 hinge connections

그림 3 힌지 연결 개수에 따른 길이방향 굽힘모멘트의 비교 (Center line, wave angle = 0°)

α 값이 0.2 또는 0.6일 때 힌지 1개인 모델의 최대 굽힘모멘트는 힌지가 없는 모델의 최대 굽힘모멘트보다 크다. 하지만 힌지가 2개인 모델부터 최대 굽힘모멘트가 감소하기 시작하여 3개일 때는 더욱 감소한다. 모델의 강성계수가 1.9798×10^{-5} 로 상대적으로 작은 조건 하에서 해석한 결과이므로 강성계수 값의 변화에 따라서 힌지를 가지는 구조물의 거동을 해석해야 할 필요가 있다. 강성계수는 식(3)으로 표현된다.

$$S = EI / \rho_w g L^5 \quad (3)$$

여기서 EI 는 굽힘강성(Bending Stiffness)을 의미하며 강성계수 S 는 무차원 계수이다.

3.2 각도 및 강성계수에 따른 최대 굽힘모멘트의 변화

실제 해상 환경에서 파랑의 입사각은(θ)는 다양하므로 0, 30, 45°로 변화시켜 굽힘모멘트를 계산하였다. 또한 같은 조건에서 모델의 강성계수(S)를 변화시켜 계산하였다.

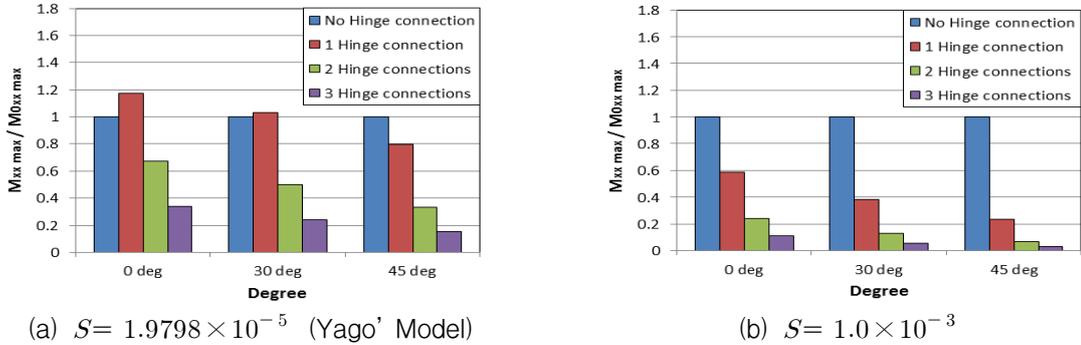


그림 4 입사각에 따른 최대 굽힘모멘트의 비 (Center line, $\alpha = 0.6$)

그림 4에서 $M_{xx \max}$ 는 힌지가 없는 모델부터 3개의 힌지가 있는 모델까지 각각의 최대 굽힘모멘트를 나타내며 $M_{0xx \max}$ 는 힌지가 없는 모델의 최대 굽힘모멘트를 말한다. 그래프의 수직 축의 값은 $M_{xx \max} / M_{0xx \max}$ 으로서 기준 값은 1이며, 1보다 크면 해당 모델의 굽힘모멘트는 힌지가 없는 모델보다 큰 것을 의미한다. 또한, 무차원 값으로써 모멘트의 상대적인 크기를 나타내며 상사법칙을 이용하여 실제 구조물에 적용시킬 수 있다. 전반적으로 각도가 증가할수록 굽힘모멘트가 감소하지만 (a)에서 보듯 힌지 1개인 모델이 힌지가 없는 모델보다 굽힘모멘트가 크며 이는 강성계수가($S = 1.9798 \times 10^{-5}$) 작을 때 발생한다. 하지만 (b)에서와 같이 모델의 강성계수를 증가시키면 이런 현상은 발생하지 않으며, 힌지의 개수가 증가할수록 굽힘모멘트는 감소한다.

4. 결론

본 논문에서는 힌지를 가지는 부유식 평판 구조물의 힌지개수 변화에 따른 유탄성 거동에 대한 연구를 수행하였다. 힌지 개수, 강성계수가 증가함에 따라 굽힘모멘트는 감소하였다. 하지만 강성계수가 작을 때는 힌지를 가지는 구조물의 굽힘모멘트가 없는 구조물 보다 클 수 있으며, 실제 이동 해상 기지와 같은 초대형 부유식구조물의 실제 응용분야에 적용시킬 때 이와 같은 조건을 고려를 해야 한다.

감사의 글

본 연구는 2012년 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20114030200040)

참고문헌

- Yago, K., Endo, H. (1996) On the hydroelastic response of box shaped floating structure with shallow draft, *Journal of The Society of Naval Architects of Japan*, 180, pp.341-352
- Fu, S., Moan, T., Chen, X. and Cu, W. (2007) Hydroelastic analysis of flexible floating interconnected structures, *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp.1516-1531