

부유구조물의 모델링 차원에 따른 유탄성 응답

홍상현¹ · 황웅익² · 이종세^{1*}

¹한양대학교 건설환경플랜트공학과, ²한양대학교 건설환경공학과

Hydroelastic Responses of Floating Structure by Modeling Dimensions

Sanghyun Hong¹, Woongik Hwang² and Jong Seh Lee^{1*}

¹Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Hanyang Univ., Ansan, 15588, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Ansan, 15588, Korea

Abstract

In this study, FE-BE direct coupling methods of 1D and 2D problems are considered for the pontoon-type floating structure and the difference of the modeling dimensions is investigated for the hydroelastic response. The modeling dimensions are defined as the 1D problem consisting 1D beam-2D fluid coupling and the 2D problem consisting 2D plate-3D fluid coupling with zero-draft assumption. For case studies, hydroelastic responses of the 1D Problem are compared to those of the 2D Problem for a wide range of aspect ratio and regular waves. It is shown that the effects of the elastic behavior are increased by decreasing the incident wavelength, whereas the effects of the rigid behavior are increased by increasing the incident wavelength. In 2D problem, the incident wave angle can be considered, and slightly more accurate results can be obtained, but the computational efficiency is lower. On the other hand, in 1D problem with plate-strip condition, the incident wave angle cannot be considered, but when the aspect ratio is large, the overall responses can be analyzed through a simplified model, and the computational efficiency can be improved.

Keywords : floating structure, hydroelastic analysis, modeling dimension, euler-bernoulli beam, kirchhoff plate

1. 서 론

유탄성(Hydroelasticity)은 유체에 의해 물체가 변형되는 운동을 고려한 상호작용의 한 분야이다(Bishop *et al.*, 1979). 일반적인 선박의 경우 길이 대비 두께가 작지 않을 뿐만 아니라 배수량에 따른 유체 복원력 대비 횡강성이 상당히 크기 때문에 구조 요소를 강체로 가정하여 설계에 반영하였다. 하지만 초대형 부유구조물(VLFS: very large floating structure)과 같이 길이 대비 두께가 상당히 작을 경우 파랑에 의해 발생하는 구조물의 탄성 거동은 유체와의 상호작용을 유발하기 때문에 유탄성 해석을 통한 응답의 평가가 필수적이다.

부유구조물의 유탄성 해석을 위한 구조물과 유체 영역의 모델링 차원은 Fig. 1과 같이 나눌 수 있다(Suzuki *et al.*, 2006). 3차원 유체와 결합되는 3차원 셸 모델은 구조물의

불균일성과 비연속성을 고려한 상세설계 단계로서 활용이 가능하지만 해석과 모델링이 복잡하고 해석이 오래 걸리는 단점이 있다. 부력 스프링부터 2, 3차원 유체까지 다양하게 결합할 수 있는 1차원 보와 2차원 평판은 비교적 모델링이 간단하고 직관적일 뿐만 아니라 부유구조물의 기본설계 단계로서 매우 유용하게 활용이 가능하다. 이 중 2차원 평판은 부유구조물의 두께가 얇고 넓은 면적을 가질 경우 직관적으로 적용이 가능하지만 1차원 보의 경우 변장비가 상당히 작은 부유식 교량이 가장 대표적이다.

부유구조물을 1차원 보로 한정할 경우, 파랑에 의한 응답을 분석하기 위해 단순화된 해석 방안으로 유체영역을 탄성지지 조건으로 가정한 BOEF(beam on elastic foundation)를 적용할 수 있으며, Georgiadis(1985)는 조화 가진에 의한 긴 부유구조물의 응답을 분석하기 위해 BOEF를 유한요소로

* Corresponding author:

Tel: +82-31-400-5146; E-mail: jonglee@hanyang.ac.kr

Received May 23 2016; Revised June 3 2016;

Accepted June 9 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

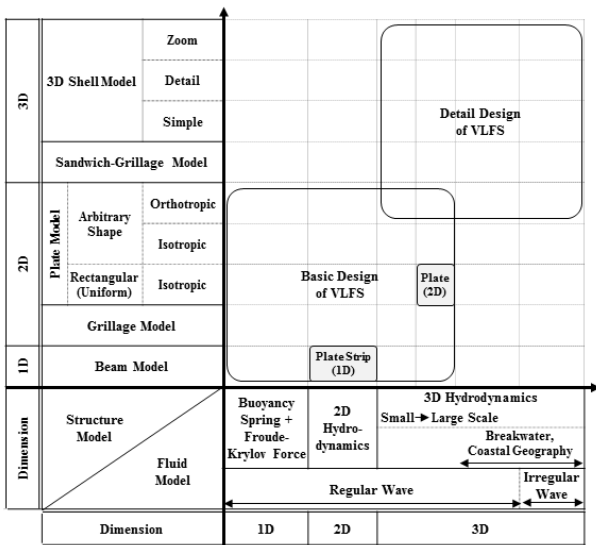


Fig. 1 Modeling dimensions for hydroelastic analysis (Suzuki *et al.*, 2006)

적용하였다. Song 등(2003)은 부유구조물의 해석을 위해 다양한 가정조건을 도입하였던 BOEF 모델들의 정확성을 분석하기 위해 Yago 등(1996)의 실험결과와 비교하였다. 하지만 BOEF 모델에서는 입사파와 구조물 탄성변형의 분산 관계를 적용하더라도 부유구조물의 엄밀한 응답을 파악하기에는 한계가 있다. 결국 파랑에 의한 부유구조물 응답의 정확성을 높이기 위해서는 BOEF와 같은 단순화 모델보다는 유체의 운동을 구조물의 탄성 거동과 결합한 상호작용 모델을 적용하여야 한다. 부유구조물의 상호작용을 고려한 유탄성 해석 방법에는 크게 모드중첩법, 고유함수 전개법, 직접법으로 나눌 수 있다(Hong, 2008). 이와 같이 다양한 유탄성 해석법에서는 파랑에 의한 유체의 운동을 주파수 영역의 자유수면 Green's function으로 적용하였으며, 상호작용 성분을 부가 질량 또는 압력으로서 고려할 수 있다. Taylor(2007)는 부유구조물의 유탄성 해석을 위해 자유수면 Green's function과의 상호작용을 압력으로 고려한 보와 평판의 모델을 제시하였다.

상기의 다양한 연구에서 고려된 구조요소 중 평판의 경우 최근까지도 많이 활용되고 있지만 보의 경우 내부 힌지가 적용된 부유구조물(Khabakhpasheva *et al.*, 2002)이나 공기안정식 부유구조물(Hong *et al.*, 2016)에 적용한 사례가 일부 있었으나 보의 특성상 활용방안이 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 폰툰 형식의 부유구조물을 Fig. 1에서 음영으로 표시한 부분과 같이 보와 평판으로 모델링했을 때 유탄성 효과를 압력으로서 고려한 수학적 정식화와 직접법을 통해 차이점을 살펴보고, 평판의 변장비에 따른 유탄성 응답을 보 모델과 비교함으로써 모델링 차원에 따른 활용방안을 제시하고자 한다.

2. 부유구조물의 유탄성 해석을 위한 수학적 정식화

2.1 유탄성 해석을 위한 기본 가정사항

본 연구에서는 입사파에 의한 폰툰 형식 부유구조물의 유탄성 해석을 위해 구조물을 등방성, 균일, 탄성재료와 단면이 일정한 구조 요소로 모델링하고, 비점성, 비압축성 유체와 비회전성 유동을 가정하였다. 구조물의 두께는 길이와 폭에 비해 상당히 얇기 때문에 홀수의 영향을 배제하였다. 이와 같은 박판의 조건에 따라 부유구조물에는 전단변형을 무시한 Kirchhoff 판과 Euler-Bernoulli 보를 적용하였다.

홀수의 영향을 배제한 부유구조물의 유탄성 문제는 Fig. 2와 같이 자유수면의 Region I(Ω_I)과 부유구조물의 Region II(Ω_{II})로 구분할 수 있다. 전체 유체 영역($\Omega_I \cup \Omega_{II}$)은 모두 일정한 수심을 가지며, 부유구조물의 하부는 Region II의 수면에 접해 있다. 입사파는 $x-y$ 평면에서 x 축의 음의 방향으로 부유구조물에 작용한다. 이러한 유체영역의 속도포텐셜 $\Phi(x, y, z, t)$ 은 라플라스 방정식을 만족하며, 바닥면과 자유수면, 평판 하부면에서의 운동학적 경계조건은 유체의 수직방향 속도와의 관계에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi = 0, -H < z < 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = -H \tag{2}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad \text{on } z = 0(\Omega_I) \tag{3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad \text{on } z = 0(\Omega_{II}) \tag{4}$$

여기서, $\zeta(x, y, t)$ 는 자유수면 변위이며, $w(x, y, t)$ 는 부유구조물의 변위를 나타낸다. 그리고 미소 진폭파로 가정된 입사파에 의한 유체의 압력(P)은 선형화된 Bernoulli 방정식으로 나타낼 수 있으며, 식 (3)과 (4)를 적용하면 자유수면(Ω_I)과 부유구조물 하부면(Ω_{II})에서의 동역학적 경계조건은 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

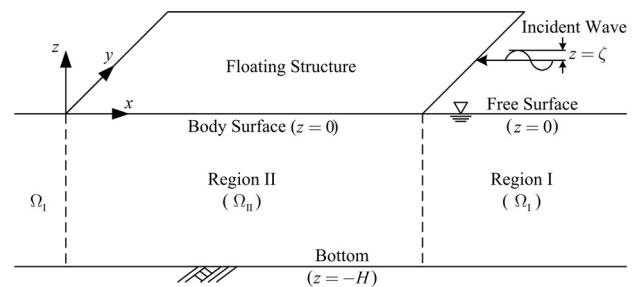


Fig. 2 Definition of hydroelastic problem

$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0(\Omega_I) \quad (5)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0(\Omega_{II}) \quad (6)$$

본 연구에서 고려한 입사파는 일정한 진동수(ω)를 가지는 정현파로 가정하였기 때문에 부유구조물의 유탄성 해석을 위해 속도포텐셜, 유체압력, 자유수면 및 부유구조물의 변위는 주파수 영역으로 $\Phi = \phi e^{i\omega t}$, $P = p e^{i\omega t}$, $\zeta = \zeta e^{i\omega t}$, $w = \underline{w} e^{i\omega t}$ 와 같이 변환하여 시간에 대해 독립적으로 나타낼 수 있다.

2.2 2차원 평판을 적용한 유탄성 해석의 지배방정식

유탄성 해석을 위한 2차원 평판과 3차원 유체가 결합된 상호작용 모델에서 Kirchhoff 판을 적용할 경우, 주파수 영역으로 변환한 구조물의 지배방정식은 다음과 같다.

$$D\nabla^4 \underline{w}(x,y) = p(x,y) + \omega^2 \rho h \underline{w}(x,y) \quad (7)$$

여기서, D 는 휨강성, \underline{w} 는 변위, p 는 유체의 압력, ρ 는 밀도, h 는 판의 두께를 나타낸다. 입사파에 의한 유체영역의 압력은 경계적분방정식과 자유수면 Green's function $G(\bar{x};\bar{\xi})$ 을 통해 구할 수 있다. $G(\bar{x};\bar{\xi})$ 는 유체 속도포텐셜의 바닥면과 자유수면 경계조건과 동일하며, 속도포텐셜은 입사파, 산란, 방사 포텐셜의 중첩으로 나타낼 수 있다. 부유구조물과 자유수면의 경계에서는 입사파 포텐셜 ϕ^{Inc} 만이 독립적으로 존재하므로 $\bar{x} \in \Omega_{II}$ 일 경우, 부유구조물 영역의 유체는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Hermans, 2001).

$$-4\pi\phi + 4\pi\phi^{Inc} = \iint \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) dA \quad (8)$$

식 (8)에 식 (5)와 동일한 관계를 가지는 자유수면 Green's function의 동역학적 경계조건을 대입한 후, 부유구조물 영역의 속도포텐셜(ϕ)을 압력(p)으로 변환하기 위해 주파수 영역으로 변환한 식 (6)을 적용하면 다음과 같다.

$$-4\pi \left(\frac{ig}{\omega} \underline{w} + \frac{i}{\omega \rho_w} p \right) + 4\pi\phi^{Inc} = \frac{i\omega}{\rho_w g} \iint p G dA \quad (9)$$

여기서, 미지수는 평판의 변위와 평판 하부에 작용하는 압력이며, 압력은 산란, 방사, 정수압 성분의 합으로 구성된다.

2.3 1차원 보를 적용한 유탄성 해석의 지배방정식

2D-Problem에서는 네 면의 자유단으로 구성된 평판에 입사파에 의한 압력이 작용하지만 1차원 보-2차원 유체 결합의 1D- Problem은 Fig. 3에서 빗금으로 나타낸 영역과 같이 평판 스트립의 조건을 가지며, 구조 모델은 Bernoulli-Euler 보로 가정할 수 있다. Bernoulli-Euler 보의 기본적인 가정 사항은 Kirchhoff 판과 유사하지만 휨 강성 D 는 EI 로 대체되며, 유탄성 해석을 위해 보의 변위와 압력을 주파수 영역으로 변환한 지배방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{EI}{B} \frac{\partial^4 \underline{w}(x)}{\partial x^4} = p(x) + \omega^2 \rho h \underline{w}(x) \quad (10)$$

또한 $x-z$ 평면의 2차원으로 한정된 유체영역의 경계적분 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$2\pi\phi - 2\pi\phi^{Inc} = \int \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds \quad (11)$$

1D-Problem의 유탄성 해석을 위한 경계적분방정식은 2D-Problem에서와 같이 식 (11)에 유체영역에 관한 경계조건을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$2\pi \left(\frac{ig}{\omega} \underline{w} + \frac{i}{\omega \rho_w} p \right) - 2\pi\phi^{Inc} = \frac{i\omega}{\rho_w g} \int p G dx \quad (12)$$

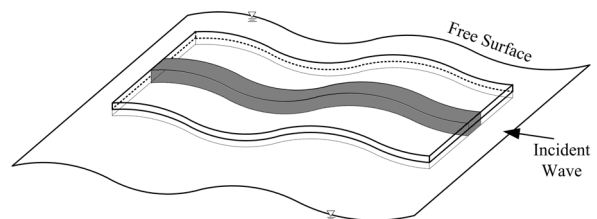


Fig. 3 Plate and strip for the floating structure

2.4 수치해석을 위한 이산화

부유구조물의 유탄성 문제는 구조물의 지배방정식에 유한 요소를 유체영역의 경계적분방정식에 경계요소를 적용한 뒤, 입사파압에 의한 부유구조물의 변위와 상호작용에 의한 압력을 미지수로서 결합하여 접근할 수 있다. 이를 위해 2D-Problem에서는 식 (7)과 (9), 그리고 1D-Problem에서는 식 (10)과 (12)를 적용하였으며, 여기에 가상변위와 가상 압력을 각각 적용하여 변분정식화 하였다. 수치해석을 위한

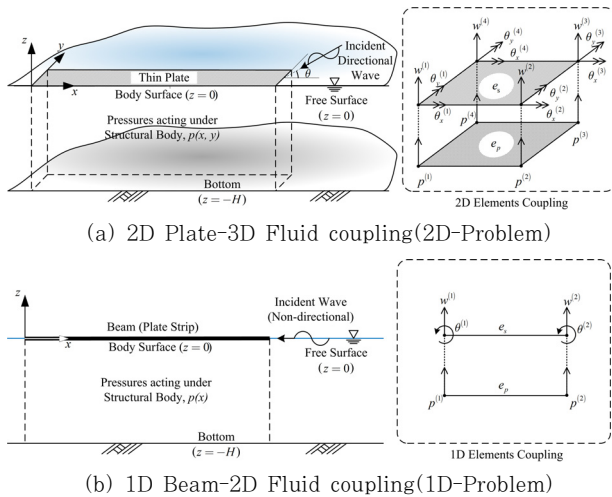


Fig. 4 Coupling conditions for hydroelastic problem

최종 행렬 방정식을 유도하기 위해서 Fig. 4와 같이 평판은 절점당 3자유도를 가지는 MZC 사각 평판 요소를 사용하였으며, 보는 절점당 2자유도를 가지는 2절점 보 요소를 사용하였다. 또한 유체의 압력은 각 요소의 절점에서 수직방향 자유도로만 작용하여 구조물의 변위와 유체의 압력의 상호작용이 직접 연계되도록 하였다. 이와 같이 구성된 요소(e)가 부유구조물이 존재하는 Region II(Ω_{II})의 영역에 포함될 경우, 구조물과 유체압력의 최종적인 행렬 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega^2 \mathbf{M}_s \hat{\mathbf{w}} - \mathbf{K}_s \hat{\mathbf{w}} + \mathbf{C}_s \hat{\mathbf{p}} = \mathbf{0} \quad \text{for structure} \quad (13)$$

$$\mathbf{C}_f \hat{\mathbf{w}} - \mathbf{F}_{hs} \hat{\mathbf{p}} + \mathbf{F}_{hd} \hat{\mathbf{p}} = \mathbf{P}_f \quad \text{for fluid pressure} \quad (14)$$

여기서, \mathbf{M}_s 는 부유구조물의 질량행렬, \mathbf{K}_s 는 부유구조물의 강성행렬, $\hat{\mathbf{w}}$ 는 부유구조물의 변위벡터, $\hat{\mathbf{p}}$ 는 유탄성 효과에 따른 압력벡터, \mathbf{C}_s 와 \mathbf{C}_f 는 변위와 압력의 상호작용을 반영해주는 결합행렬, \mathbf{F}_{hs} 는 유체 정역학적 행렬, \mathbf{F}_{hd} 는 Green's function이 포함된 유체동역학적 행렬(1D-Problem(-); 2D-Problem(+)), \mathbf{P}_f 는 입사파에 의한 Froude-Krylov 압력벡터를 나타낸다. 식 (14)에서 \mathbf{F}_{hd} 에 포함된 Green's function의 수치계산 편의성을 위해서 급수형태로 변환하면 2D와 1D-Problems의 Green's functions는 각각 다음과 같다(John, 1950; Khabakhpasheva *et al.*, 2002).

$$G = \frac{1}{2} \frac{K^2 - k_0^2}{H(k_0^2 - K^2) + K^2} \cosh^2(k_0 H) [Y_0(k_0 R) + iJ_0(k_0 R)] - \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2 + K^2}{H(k_n^2 + K^2) - K} \cos^2(k_n H) K_0(k_n R) \quad (15)$$

Table 1 Properties of 1D and 2D-Problems

Part	Variables	1D-Problem	2D-Problem
Coupling	Dimensions	1D Beam-2D Fluid (Plate Strip)	2D Plate-3D Fluid (Plate)
	Theory	Bernoulli-Euler beam	Kirchhoff plate
Struct.	Flexural Rigidity	$EI, I = Bh^3/12$	$D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$
	Characteristic Length (Rigid/Flexible)	$\lambda_c = 2\pi(EI/k_c)^{1/4}, k_c = \rho_w g B$	$\lambda_c = (D/\rho_w g)^{1/4}$
	Dimensionless Mass	$\gamma = \frac{\rho h}{\rho_w L} = \frac{d}{L}, d = \text{Draft}$	
	Aspect Ratio	$b = B/L$	
	Hydroelastic Response	RAO : $ w = \sqrt{\text{Re}(w)^2 + \text{Im}(w)^2}$	
Fluid	Incident Angle	$\theta = 0$	θ
	Singularity of Free-surface Green's Func.	Non.	$\bar{x} = \bar{\xi}$
	Water Depth	$\delta = H/L$ or kH	
	Relative Wavelength	λ/L	

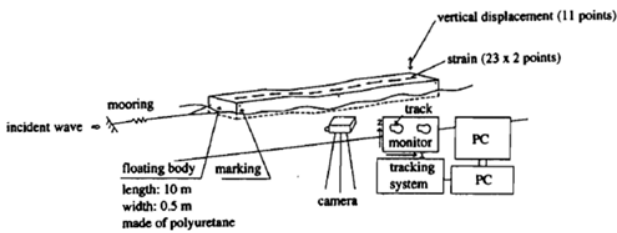
$$G = \frac{ik_0 e^{-ik_0 x - \xi}}{H(k_0^2 - K^2) + K} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n e^{-k_n |x - \xi|}}{H(k_n^2 - K^2) + K} \quad (16)$$

부유구조물의 유탄성 해석을 위해 급수형태로 적용한 자유수면 Green's functions에서 1D-Problem의 경우 singularity가 발생하지 않지만 2D-Problem에서는 $\bar{x} = \bar{\xi} (R=0)$ 의 조건에서 singularity가 발생한다. 본 연구에서는 2D-Problem에서의 singularity를 해결하기 위해 $\bar{x} = \bar{\xi}$ 일 경우 요소의 적분점을 다르게 적용하는 간단한 방법을 적용하였다(Newman, 1985; Wang *et al.*, 2004). 이와 같은 수치해석 상의 차이점을 포함하여 부유구조물의 유탄성 해석에 있어 모델링 차원에 따른 물성치의 차이를 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 이와 같은 두 가지 모델링 방법을 적용한 수치예제를 통해 유탄성 응답의 차이와 적용방안을 살펴보고자 한다.

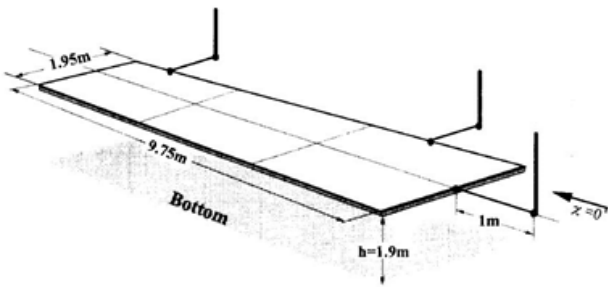
3. 유탄성 해석의 검증 및 응답 특성

3.1 모델링 차원에 따른 유탄성 해석 모델

본 연구에서는 부유구조물의 모델링 차원에 따른 유탄성 해석 결과의 검증을 위해 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 폰톤 형식으로서 Utsunomiya 등(1995)과 Yago 등(1996)에서 고려한 두 가지 실험모델의 결과와 비교하였다.



(a) Beam(Plate Strip) Model(Utsunomiya *et al.*, 1995)



(b) Plate Model(Yago *et al.*, 1996)

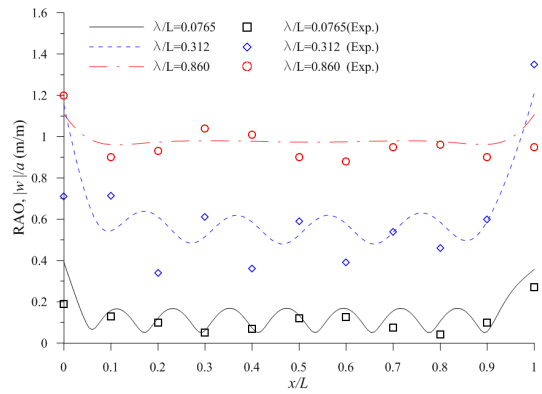
Fig. 5 Experimental models for floating structures

Utsunomiya 등(1995)에서 고려한 폰툰 형식의 VLFS는 1/100 축소모델로서 평판의 스트립 조건을 양 자유단의 보 모델로 가정하였다. 보 모델은 상사법칙에 따라 길이 10m, 폭 0.5m, 두께 0.038m, 홀수 0.00836m의 기하학적 제원과 밀도 225.5kg/m^3 , 휨 강성 235Nm^2 의 물성치를 가진다. 또한 실험이 수행된 수조의 수심은 1.1m이며, 입사파고는 0.01m이다. Yago 등(1996)의 실험모델은 일본 Mega-Float Phase I-Prototype의 1/30.77 축소모델로서 1/5의 변장비를 가지는 자유단 평판으로 가정하였다. 실험모델은 길이 9.75m, 폭 1.95m, 두께 0.0545m, 홀수 0.0166m의 기하학적 제원과 밀도 312.2kg/m^3 , 휨 강성 10.12kNm 의 물성치를 가진다. 실험을 수행한 수조의 수심은 1.9m이며, 입사파고는 0.1m이다.

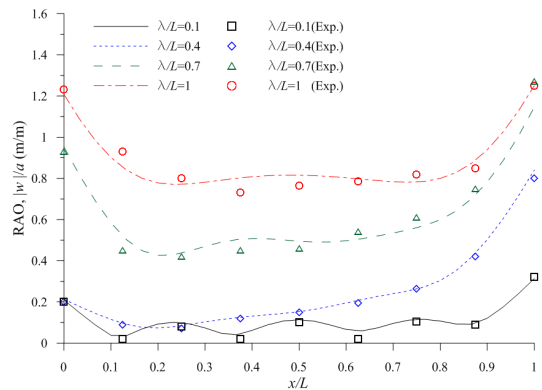
상기의 두 가지 실험모델 모두 폰툰 형식의 부유구조물로서 유한수심 조건을 적용하였지만 구조물 모델링 조건에서 보와 평판으로 구분되며, 이로 인해 입사파로 인한 유탄성 응답에서도 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 두 실험모델들의 구분을 위해 Utsunomiya 등(1995)의 실험모델을 Model-1D, 그리고 Yago 등(1996)의 실험모델을 Model-2D로 명명하였다.

3.2 실험결과와의 비교와 응답 특성

유탄성 해석 결과와 실험결과의 비교를 위한 입사파는 부유구조물의 우측단부($x/L=1$)에서 작용하였다. 또한, 입사파장(λ/L)은 Model-1D에서는 0.0765, 0.312, 0.860, 그리고 Model-2D에서는 0.1, 0.4, 0.7, 1.0을 각각 적용하였으며,



(a) Model-1D with Aspect Ratio 0.05



(b) Model-2D with Aspect Ratio 0.2

Fig. 6 Comparison of hydroelastic responses

이에 따른 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 x 축은 부유구조물의 전체 길이(L)에 대한 길이 방향 위치를 무차원화하여 0부터 1까지 나타낸 것이며, y 축은 입사파고에 대한 수직 방향 변위를 RAO로 나타낸 것이다.

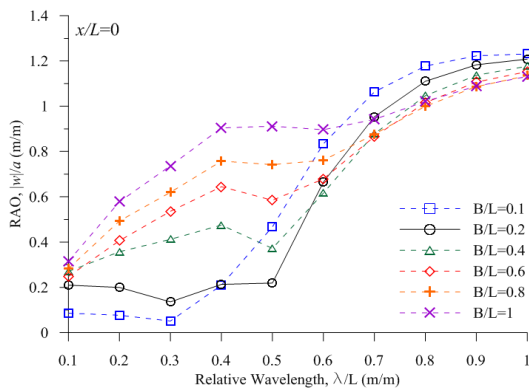
Fig. 6에 나타난 바와 같이 입사파와 부유구조물의 상호작용을 압력으로 정의한 해석결과와 실험결과는 Model-1D와 Model-2D 모두 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 모델에 따른 응답특성으로서 Model-1D의 경우 입사파의 조건이 달라지더라도 양단에서의 RAO가 모두 크게 나타나지만 Model-2D의 경우 입사파가 짧을 때 후미부($x/L=0$)의 RAO가 선미부($x/L=1$)에 비해 상당히 작게 나타난다. 입사파장에 따른 양 단부에서의 유탄성 응답은 두 모델간의 차이가 다소 존재하지만 입사파장이 짧을 경우($\lambda/L \leq 0.1$) 중앙부의 RAO는 0.2이하로서 입사파고에 비해 부유구조물의 수직방향 변위가 현저하게 작게 발생한다. 또한, 입사파장이 부유구조물의 길이와 거의 같은 긴 입사파가 작용할 경우 RAO는 1에 가깝게 발생한다. 이는 부유구조물의 탄성거동과 입사파의 상호작용에 의한 것으로서 입사파가 짧아질수록 탄성거동의 영향이 큰 반면에 입사파가 길어질수록 강체거동이 지배적으로 나타나기 때문이다.

즉, 두 모델의 유탄성 응답은 면적 대비 두께가 상당히 얇은 VLFS의 기하학적 특성 때문에 입사파가 짧아질수록 탄성거동의

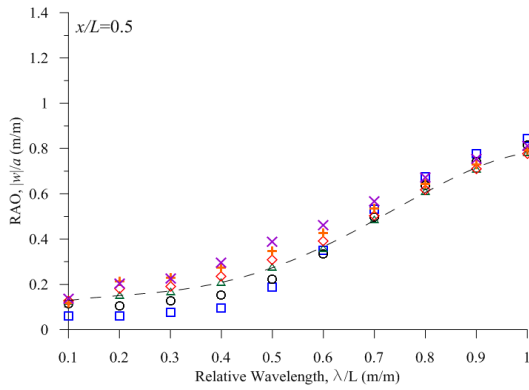
영향이 커지며, 모델링 차원에 따라 후미부 응답에서 뚜렷한 차이가 발생한다.

4. 부유구조물의 변장비에 따른 유탄성 응답

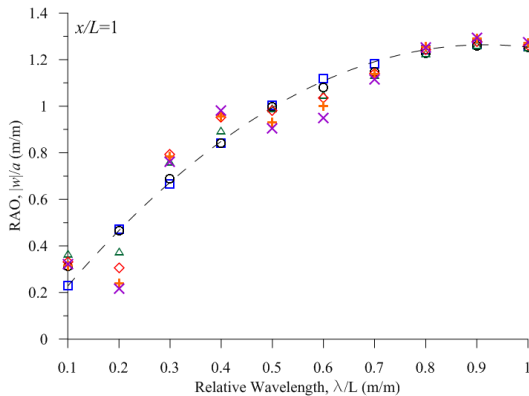
Zi 등(2010)에 따르면 유탄성의 특성상 부유구조물이 동일한 물성치를 가진다면 크기가 다르더라도 변장비(B/L)가 같을 경우 유탄성 응답은 동일하게 나타난다. 즉, 사각평면을 가지는 부유구조물의 유탄성 응답은 변장비에 따라 달라지며, 우선 평판 조건인 Model-2D의 변장비에 따른 유탄성 응답의 차이를 살펴보고자 한다.



(a) Aft-end



(b) Center



(c) Fore-end

Fig. 7 RAOs for each aspect ratio(Model-2D)

Model-2D의 실험 제한상 변장비는 0.2로서 길이 9.75m에 대한 변장비를 0.1부터 1까지 변화시켰으며, 부유구조물의 폭 방향 중앙부($y/B=0.5$)를 기준으로 입사파장(λ/L)에 따른 양 단부와 중앙에서의 RAO를 Fig. 7에 나타내었다. 입사파의 파장이 긴 장주기파가 될수록 강체거동의 영향으로 인해 세 지점 모두 변위가 증가하는 경향을 나타내며, 변장비가 변하더라도 선수부(fore-end)와 중앙부(center)에서의 변위는 큰 차이가 발생하지 않는다. 하지만 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 후미부(aft-end)의 변위는 입사파장(λ/L)이 0.6 이하의 범위에서 변장비에 따라 큰 변동 폭을 나타내며, 특히 $0.2 \leq \lambda/L \leq 0.5$ 의 범위에서 이러한 경향이 두드러진다. 이는 부유구조물의 폭이 좁아짐에 따라 평판의 양 측면부에서 작용하는 압력으로 인한 횡방향 탄성거동의 차이가 발생하기 때문이다.

즉, 강체거동의 영향이 큰 장주기파에서는 변장비가 변하더라도 유탄성 응답에서 큰 차이가 발생하지 않지만 비교적 짧은 파에서는 탄성거동의 영향이 증가하기 때문에 응답의 차이가 발생하게 된다.

5. 모델링 차원에 따른 유탄성 응답

일반적으로 보 모델은 길이 대비 폭이 좁은 구조에 적용할 수 있지만 부유구조물의 경우 유체영역과의 상호작용으로 인해 평판의 스트립 구조로 적용 범위가 제한된다. 부유구조물의 유탄성 해석에 있어 평판의 스트립 가정조건에 따라 1차원 보와 2차원 유체가 결합된 1D-Problem은 계산의 효율성을 도모할 수 있을 뿐만 아니라 구조적 거동이 1차원으로 한정되어 유탄성 효과를 파악하기에 효과적이다. 하지만 앞 절에서 나타난 바와 같이 평판(Model-2D)의 경우 변장비에 따라 유탄성 응답이 달라지므로 계산의 효율성을 위해서는 평판의 변장비에 따른 보 모델의 적용 가능 범위를 분석할 필요가 있다.

이를 위해 1차원 보와 2차원 평판에 적용한 부유구조물의 제한은 Model-2D와 동일하며, 변장비(B/L)를 0.2에서 0.5, 0.8, 1로 변화시켰다. 이에 따른 RAO를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 따르면 변장비 뿐만 아니라 입사파의 조건(λ/L)에 따라서도 보와 평판의 응답은 차이를 나타낸다. 입사파장과 부유구조물의 길이가 같은 $\lambda/L=1$ 에서는 강체 거동의 영향이 크기 때문에 변장비가 다르더라도 보와 평판의 RAO는 비교적 잘 일치한다. 하지만 유탄성 거동의 영향이 큰 $\lambda/L \leq 0.7$ 에서는 변장비에 따라 응답의 차이가 발생하며, Figs. 8(a)와 8(b)에 나타난 바와 같이 B/L 이 0.5 이하일 경우 그 차이는 더욱 두드러진다. 이는 유탄성 해석에 있어 평판의 스트립으로 가정된 보와 양 측면이 자유단인 평판의

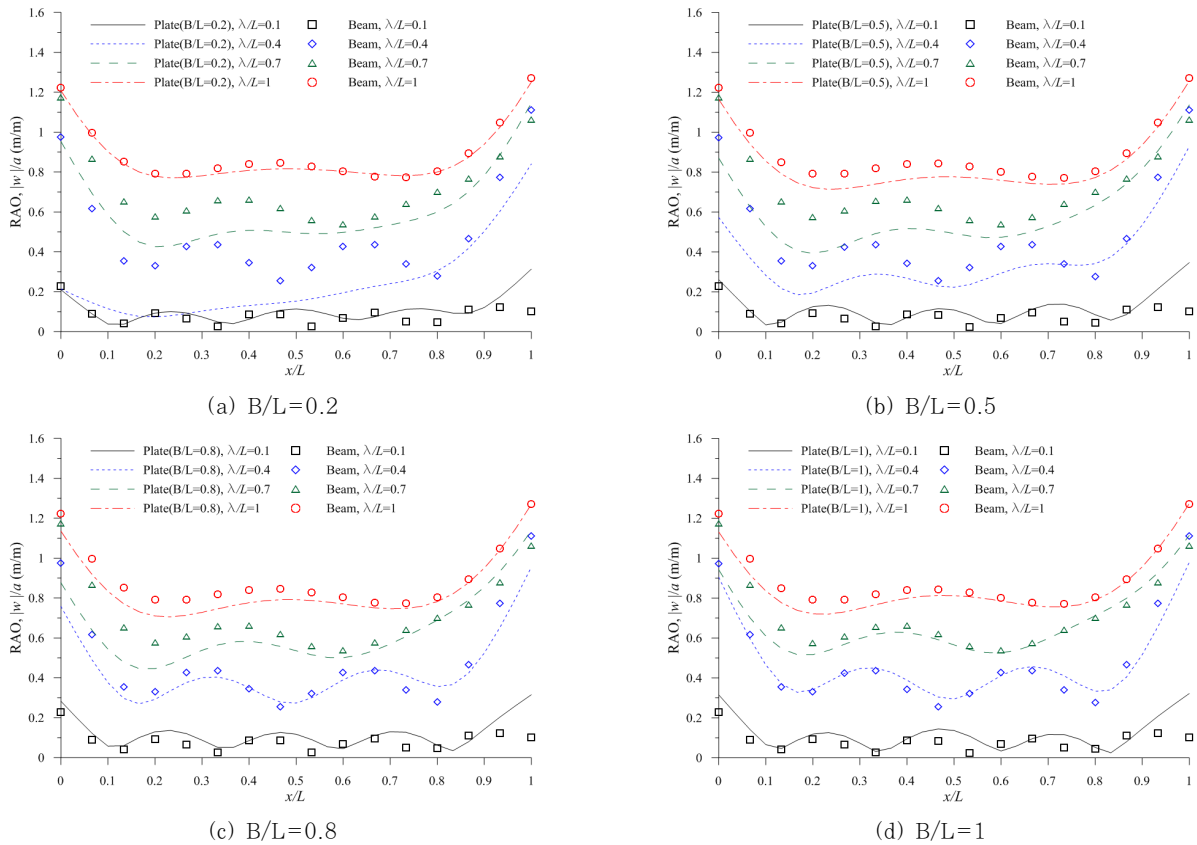


Fig. 8 RAOs of Model-2D for modeling dimensions

횡방향 구속조건에서 차이가 발생하기 때문이며, Figs. 8(c)와 8(d)에서 확인할 수 있듯이 변장비가 0.8 이상이 되어야 두 모델의 응답이 유사하게 나타난다.

상기에서 비교한 두 모델은 응답뿐만 아니라 수치 계산량에 있어서도 큰 차이를 나타내게 되며, 유탄성 해석의 수치해석을 위한 행렬 중에 Green's function이 포함된 유체동역학적 행렬(\mathbf{F}_{hd})의 구성에 가장 많은 계산량이 소요된다. 보를 m 개의 요소로 분할하고, 평판을 $m \times n$ 개의 요소로 분할한다면 각 절점의 자유도에 따른 계산량을 제외하고 유체동역학적 행렬을 구성하는데에만 각각 m^2 , $m^2 \times n^2$ 번의 계산량이 필요하다. 즉, 1차원 보를 활용한 유탄성 해석 모델은 입사파의 각도는 고려할 수 없지만 변장비가 1에 가까울 경우에는 직관적인 모델을 통해 전반적인 응답을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 계산의 효율을 높일 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 폰텐 형식의 부유구조물을 보(1D)와 평판(2D)으로 모델링했을 때 유탄성 효과를 입력으로서 고려한 직접법을 통해 해석 조건의 차이점을 살펴보고, 모델링 차원에 따른 응답의 차이를 평판의 변장비를 통해 분석하였다.

본 연구에서 고려한 부유구조물의 유탄성 해석을 위한 대표적인 모델링 차원은 1차원 보-2차원 유체 결합의 1D-Problem과 2차원 평판-3차원 유체 결합의 2D-Problem으로 구분할 수 있다. 2D-Problem은 박판의 조건으로서 Kirchhoff 판을 적용하였으며, 네 면의 자유단으로 구성된 평판에 입사파와 상호작용에 의한 압력이 작용한다. 반면에 구조 모델을 Bernoulli-Euler 보로 적용한 1D-Problem은 자유수면 Green's function으로 정의된 유체 압력과의 모델링 차원 결합으로 인해 평판 스트립의 조건을 가지게 된다. 모델링 조건이 다르더라도 두 모델은 공통적으로 길이 대비 두께가 상당히 얇고 휨강성이 상대적으로 작은 특성을 가지기 때문에 단주기파에서는 탄성거동으로 인한 유탄성 효과가 커지게 된다.

두 모델의 응답을 비교하기 위해 동일한 수치예제를 적용한 후 변장비와 입사파 조건을 변수로 적용하였다. 이에 따르면 강체거동의 영향이 큰 장주기파($\lambda/L=1$)에서는 변장비가 변하더라도 두 모델의 유탄성 응답이 거의 유사하게 나타난다. 하지만 탄성거동의 영향이 지배적인 단주기파($\lambda/L \leq 0.7$)에서는 모델링 차원에 따라 후미부의 응답에서 뚜렷한 차이가 발생하며, 변장비가 0.8 이상이 되어야 두 모델의 응답이 유사하게 나타난다.

즉, 부유구조물의 유탄성 해석을 위한 모델링 차원 결정시 변장비에 따른 검토가 필수적이며, 평판의 변장비가 1에 가까울 경우에 1차원 보 모델을 유탄성 해석에 적용 가능하다. 1차원 보 모델은 비록 입사파의 각도는 고려할 수 없지만 보다 단순화된 모델링 조건으로서 부유구조물의 전반적인 응답을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 계산의 효율을 높일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 지원(15IFIP-B067108-03)으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

Bishop, R.E.D., Price, W.G. (1979) *Hydroelasticity of Ships*, Cambridge University Press, New York.

Georgiadis, C. (1985) Finite Element Modeling of the Response of Long Floating Structures under Harmonic Excitation, *J. Energ. Resour.-ASME*, 107(1), pp.48~53.

Hermans, A.J. (2001) A Geometrical-optics Approach for the Deflection of a Floating Flexible Platform, *Applied Ocean Research*, 23(5), pp.269~276.

Hong, S., Lee, J.S. (2016) Hydroelastic Response Analysis of Pneumatically Supported Floating Structures Using a BEM-FEM Coupling Method, *KSCE J. Civ. Eng.*, Online Publish, pp.1~10.

Hong, S.Y. (2008) *Development of Design Technology of Very Large Floating Structures*, Final Research Report UCPM0139A-37-2, Ministry of Oceans and Fisheries.

John, F. (1950) On the Motion of Floating Bodies II. Simple Harmonic Motions, *Comm. Pure & Appl. Math.*, 3(1), pp.45~101.

Khabakhpasheva, T.I., Korobkin, A.A. (2002) Hydroelastic Behaviour of Compound Floating Plate in Waves, *J. Eng. Math.*, 44(1), pp.21~40.

Newman, J.N. (1985) Algorithms for the Free-surface Green function, *J. Eng. Math.*, 19(1), pp.57~67.

Song, H., Peng, X.-n., Sun, H., Cui, W.-c., Liu, Y.z. (2003) On Beam-on-elastic-foundation (BOEF) Model for the Hydroelastic Response Analysis of Mat-like VLFS, *J. Ship Mech.*, 7(6), pp.116~129.

Suzuki, H., Bhattacharya, B., Fujikubo, M., Hudson, D.A., Riggs, H.R., Seto, H., Shin, H., Shugar, T.A., Yasuzawa, Y., Zong, Z. (2006) ISSC Committee VI.2: Very Large Floating Structures, *Proc. 16th Int. Ship & Offshore Struct. Congress*, Southampton, UK, pp.391~442.

Taylor, R.E. (2007) Hydroelastic Analysis of Plates and Some Approximations, *J. Eng. Math.*, 58(1), pp.267~278.

Utsunomiya, T., Watanabe, E., Wu, C., Hayashi, N., Nakai, K., Seika, K. (1995) Wave Response Analysis of a Flexible Floating Structure by BE-FE Combination Method, *Proc. 5th Int. Offshore & Polar Eng. Conf.*, pp.400~405.

Wang, C.D., Meylan, M.H. (2004) A Higher-order-coupled Boundary Element and Finite Element Method for the Wave Forcing of a Floating Elastic Plate, *J. Fluid. & Struct.*, 19(4), pp.557~572.

Yago, K., Endo, H. (1996) On the Hydroelastic Response of Box-shaped Floating Structure with Shallow Draft (Tank Test with Large Scale Model), *J. Soc. Naval Arch. Japan*, 180, pp.341~352.

Zi, G., Kim, J.G., Lee, S.O., Lee, P.-S. (2010) Development of a Design Chart for the Initial Design Stage of Very Large Floating Structures, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 30(3B), pp.315~324.

요 지

본 연구에서는 부유구조물 모델링의 효율성 및 응답의 정확성을 분석하기 위해 유체 영역을 압력으로 정의한 유탄성 해석법에 1차원 보-2차원 유체 결합의 1차원 문제와 2차원 판-3차원 유체 결합의 2차원 문제를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 1차원 문제와 2차원 문제의 모델링 차원에 따른 응답을 비교하기 위해 다양한 평판의 변장비와 입사파의 조건을 적용하였다. 이에 따르면 강체거동의 영향이 큰 장주기파에서는 변장비가 변하더라도 두 문제의 유탄성 응답이 거의 유사하게 나타나지만 탄성거동의 영향이 지배적인 단주기파에서는 모델링 차원에 따라 뚜렷한 차이가 발생한다. 즉, 1차원 보 모델은 비록 입사파의 각도는 고려할 수 없지만 평판의 변장비가 클 경우에 유탄성 해석에 적용이 가능하다. 또한, 2차원 평판보다 단순화된 모델링 조건으로서 부유구조물의 전반적인 응답을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 수치해석의 효율을 높일 수 있다.

핵심용어 : 부유구조물, 유탄성 해석, 모델링 차원, Euler-Bernoulli 보, Kirchhoff 판