

부유식 유체 저장 구조물의 유탄성 해석

Hydroelastic Analysis of Floating Liquid Storage Structure

이 강 현* · 김 기 태** · 이 필 승***
Lee, KangHeon · Kim, Ki-Tae · Lee, Phill-Seung

요 약

본 논문에서는 규칙 파랑(Regular Wave)의 입사에 따른 부유식 유류 저장 구조물의 유탄성 거동을 해석하고 내부유체의 영향을 분석하였다. 부유식 유체 저장 구조물은 홀수(Draft)를 고려하지 않은 보(Beam)로 모델링 하였으며, 규칙 파랑은 이상유체로 가정하였다. 내부유체는 변위기반의 Lagrangian 유체 요소를 이용하였으며, 양쪽의 강체 벽면(Rigid Wall)과 바닥의 보(Beam), 자유수면으로 구성된다. 부유식 구조물 및 내부 유체는 유한요소법(FEM)을, 외부유체는 경계요소법(BEM)을 이용하여 해석하였으며, 부유식 구조물과 내부 유체는 수직변위 구속을 통해 상호작용 효과를 고려하였다. 수치 해석은 내부 유체가 존재하는 경우와 존재하지 않는 2가지 조건에 대하여 입사파의 파장을 변화시켜가며 보의 변위변화를 분석하였다.

keywords : 유탄성, 유한요소법, 슬로싱

1. 서론

FPSO(Floating Production Storage and Offloading), 부유식 유류 저장시설이 대형화됨에 따라 구조물의 모멘트분포, 공진현상 및 내부 유체의 슬로싱 현상의 영향을 고려할 수 있는 유탄성 해석의 필요성이 증대되었다. 규칙 파랑에 의한 내부유체-배의 운동에 대한 실험적 연구(Kim 2001) 및 규칙 파랑에 의한 슬로싱 현상 및 이에 따른 배의 내항성(Seakeeping)(Newman 2005)연구 등 다양한 연구가 이루어졌다.

하지만 기존의 많은 연구는 강체로 가정된 부유체를 해석하여 내부유체의 슬로싱 현상 및 규칙파랑에 의한 부유체의 뒤튐효과 및 공진현상 등을 고려할 수 없었다.

본 논문에서는 기존에 연구된 1차원 보의 유탄성 해석 모델 및 Lagrangian 유체 요소(Yun 1997)를 이용해 내부유체-부유체-규칙 입사파(Regular Incident Wave)의 연성된 수치모델 해석의 가능성을 보여준다. 또한 규칙 입사파 파장의 변화에 따른 보의 유탄성 해석 결과를 분석한다.

2. 부유식 구조물과 유체의 모델링

부유식 구조물은 1차원 Euler-Bernoulli 보 모델, 외부유체(규칙 파랑)는 포텐셜 유체, 내부유체는 압축성, 비점성, 비회전 Lagrangian 유체로 가정하였다. 문제의 해석에 있어서 부유식 구조물 및 내부유체는 유한요

* 학생회원 · 한국과학기술원 해양시스템공학전공 석박통합과정 welcome@kaist.ac.kr

** 학생회원 · 한국과학기술원 해양시스템공학전공 연구원 qlsn5@kaist.ac.kr

*** 정회원 · 한국과학기술원 해양시스템공학전공 부교수 phillseung@kaist.edu

소법, 외부유체의 경우는 경계요소법을 이용하였다. 또한 주파수 ω 를 가지는 입사파(Incident Wave)에 대하여 부유식 구조물 및 내부 유체가 주파수 ω 로 운동한다고 가정하였다..

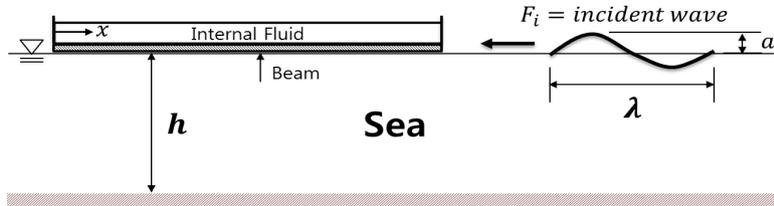


그림 1 내부유체를 가지는 1차원 보의 유탄성 해석 모델

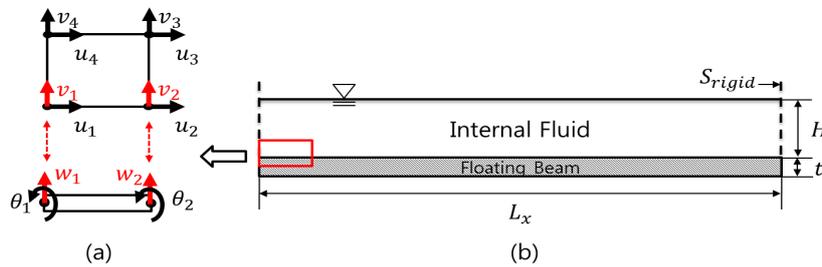


그림 2 내부유체-보 결합(a), 내부유체-보의 모델(b)

2.1. 부유식 구조물의 수학모델

그림 2(b)의 부유식 구조물(Floating Beam)의 변분식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{L_x} \left(\frac{EI}{b} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \delta w - \rho_s t \omega^2 w \delta w - P \delta w \right) dx = 0 \quad (1)$$

식 (1) 은 Euler-Bernoulli 보에 대한 변분식을 나타낸다. 여기에서 w 는 보의 수직방향 변위, P 는 유체의 압력, E 는 탄성계수, I 는 단면적의 중립축에 대한 2차 모멘트, b 는 보의 폭, ρ_s 는 보의 밀도, t 는 보의 깊이, ω 는 각 주파수, θ 는 보의 회전 변위, L_x 는 보의 길이를 의미한다. 부유식 구조물은 2절점 요소를 Hermitian 보간 함수를 적용해 이산화 하였으며 1차원 해석을 위해 흘수(Draft)를 미소하다고 가정하였다.

2.2. 외부(포텐셜) 유체의 수학모델

그림 1의 규칙 파랑은 포텐셜 유체로 가정하였으며, 지배방정식인 Laplace 방정식, Bernoulli 방정식, 그리고 Green의 정리를 이용하여 외부유체의 변분식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{L_x} \left[P \delta P + \rho_w g w \delta P - \rho_w g a e^{ikx} \delta P - \frac{1}{2\pi} \int_0^{L_x} \frac{\omega^2}{g} P G(x, \bar{x}) d\bar{x} \delta P \right] dx = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서 ρ_w 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도, a 는 입사파의 진폭, λ 는 입사파의 파장, k 는 wave number이며, 그리고 $G(x, \bar{x})$ 는 2차원 자유표면의 Green 함수이다. 유체의 압력(포텐셜)은 부유식 구조물의 절점에 맞추어 이산화 하였다. Green 함수에서 x 는 공간의 위치 그리고 \bar{x} 는 소스(source)의 위치를

의미한다. (i =complex index)

2.3. 내부유체(Lagrangian 유체 요소)의 수학적모델 및 보-내부유체 모델

그림 2(b)의 내부유체는 기존에 연구된 4절점 Lagrangian 유체 요소(Yun 1997)를 사용하였으며, 2절점 보 요소와 그림 2(a)처럼 수직방향 변위($w_1 = v_1, w_2 = v_1$)를 연동시켜 상호작용 효과를 고려하였다.

3. 유탄성 보 모델의 해석

표 1 유탄성 수치모델의 물성치

보		외부유체(규칙 파랑)		내부유체	
L_x	100.0 (m)	g	9.8 (m/s ²)	L_x	100.0 (m)
t	1.0 (m)	a	1.0 (m)	H	3.0 (m)
b	20.0 (m)	λ	30.2, 60.4 (m)	ρ_w	1000 (Kg/m ³)
E	5.798 X 10 ⁷ (Kg.m ²)	h	30.0 (m)		
ρ_s	8.0 (Kg/m ³)	ρ_w	1000 (Kg/m ³)		

해석의 편의를 위해 보, 외부유체, 내부유체 모두 길이방향으로 100개의 유한요소를 사용하였으며, 내부유체의 경우 높이 방향으로 3개의 유한요소를 사용하였다.

본 수치해석에서는 내부유체의 영향을 분석하기 위해 2가지 조건(조건 1: 내부 유체가 존재하지 않는 경우, 조건 2 : 내부유체가 존재하는 경우)을 고려하였다. 입사파의 진폭($a=1.0$)일 때 파장($\lambda=30.2, 60.2$)을 변화시키면서 보의 변위변화를 계산하였다. 여기서, 내부유체, 보, 외부유체의 물성치는 표 1과 같으며, h 는 외부유체의 수심, H 는 내부유체의 수심이다.

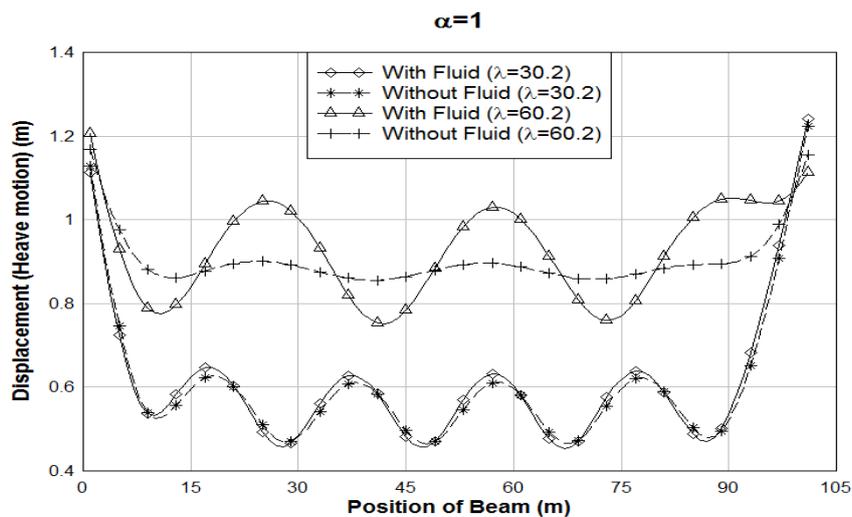


그림 3 보의 변위 $a = 1$

그림 3을 통해 내부 유체가 있는 경우 내부 유체가 없는 보의 변위보다 큰 것을 볼 수 있다, 특히, 입과사의 파장이 길 때($\lambda=60.2$) 내부유체가 존재하는 경우 보의 중심에서 변위변화가 내부유체가 존재하지 않는 경우보다 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 따라서 내부유체가 존재하는 경우 보 내부의 응력이 크게 증가함을 유추 할 수 있으며, 이런 보 변위의 증가는 내부 유체 효과에 의해 발생됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 1차원 보의 유탄성 해석에서 내부유체 효과에 의한 변위의 변화를 살펴보았다. 특히 장파의 경우 내부유체 효과가 커지는 현상을 볼 수 있었다. 본 연구는 미소 홀수로 가정된 1차원 보를 사용하여 해석되었으며, 내부유체에 의한 홀수 증가가 없다고 가정하여 이루어졌다. 실제 초대형 유류 저장시설 및 운반선은 홀수를 고려하여 해석이 이루어져야 하며 홀수 증가에 따른 초기 정수압 효과 등이 고려되어야 한다. 또한 이번 연구에서는 내부 유체의 양쪽 벽면을 강체로 가정하였으며, 이는 탱크의 변형을 고려하기 힘들다. 본 연구를 바탕으로 일반적인 3차원 모델에 대한 수치해석을 수행하면 내부유체에 의한 탱크 및 전체 구조물의 뒤틀림 효과, Roll 운동의 변화 등이 고려된 부유식 구조물의 유탄성 해석이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20114030200040)

참고문헌

- Bathe K.J.** (1996) Finite element procedures, *Prentice Hall*, New York
- Kim Y. S., Yun C.B.** (1997) A spurious free four-node displacement-base fluid element for fluid-structure interaction analysis, *Engineering Structures*, (19), pp.665-678
- Watanabe E., Utsunomiya T. and Wang C.** (2004) Hydroelastic analysis of pontoon-type vlfs: a literature survey, *Engineering Structures*, Vol. 26, pp.245-256.
- Taylor R.E.** (2007) Hydroelastic analysis of plates and some approximations, *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 58, pp.267-278.