

유체 탱크 구조물의 접수 진동 특성에 관한 연구

서명갑[†]·석호일·이철원
STX조선해양 진동소음연구팀

Study on Vibration Characteristics of Fluid Tank Structure for Ship

Myeng-Kab Seo[†]·Ho-Il Seok·Chul-Won Lee
Noise and Vibration Research Team, STX Offshore & Shipbuilding

Abstract

In the engine room and the aft body, there are so many fluid tanks such as fresh water tank and oil tank. The vibration analysis for the fluid tank structures has to consider the added mass effect due to the fluid. However, it is known that the result of the fluid tank has the difference according to the boundary condition of the fluid field such as infinite fluid and finite fluid. In this paper, a numerical case study is carried out for the research about the vibration characteristics of the fluid tank with various fluid field. In addition, an experimental study is carried out to verify the validity of the vibration analysis for the fluid tank structure.

Keywords : Fluid Tank (유체 탱크), Virtual Mass Method (가상 질량법), Hydroelastic Vibration (유탄성 진동)

1. 서론

선박의 엔진룸과 선미부에는 물이나 오일로 채워진 탱크 구조물들이 많이 배치되어 있다. 일반적으로 유체가 접하게 되면 구조물의 고유진동수가 낮아지기 때문에 선박의 주요 기진력과의 공진가능성이 높아진다. 또한 건조 후 유체 탱크에 과도 진동이 발생하게 되면 여러 작업상의 제약 조건으로 인해 방진 대책 적용이 쉽지 않다. 이러한 이유로 설계 단계에서 유체 구조물에 대한 신뢰성 있는 방진 설계가 요구된다.

유체-구조 연성 문제를 해석하기 위한 연구는 지금까지 활발히 진행되어 왔다. 접수진동에 대한 연구로서 김극천(1979)은 무한유체에서의 평판의 고유진동수를 계산하였고, 한상보와 곽문규(1996), 이호섭(1984), 최수현(2002) 등은 원환판, 유공판 및 직사각형 탱크의 접수진동 특성에 대해 실험적으로 연구하였다.

이러한 접수 진동에 대한 이론적, 실험적 연구는 특정한 유체장에 한정되어 검토되었다. 하지만 유체장의 경계 조건, 인접 구조의 변화 등에 따른 진동 특성 연구는 거의 이루어 지지 않았다. 또한 실선에서 유체 탱크 구조물에 대한 실험적 연구는 사례를 찾아 볼 수가 없다. 따라서, 본 연구에서는 유체장의 경계 조건 및 인접 구조 변화 등에 따른 동일한 판 구조물의 진동 특성을 검토하고자 한다.

본 연구에서는 무한유체장과 유한유체장에 대하여 동일한 판 구조물에 대하여 해석을 통한 진동 특성을 증점적으로 분석하였으며, 실험을 통해 타당성을 검토하였다.

2. 운동 방정식

일반적으로 구조의 운동방정식은 아래와 같다.

$$[M] \{\ddot{X}(t)\} + [K] \{X(t)\} = F(t) \quad (1)$$

여기서 M, K 는 구조물의 질량, 강성행렬이며, F는 힘을 나타낸다.

식(1)의 운동방정식을 이용하여 유체 구조 상호작용에 의한 운동방정식을 계산하는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

유체와 접하는 구조물은 진동에 의한 유체 내에 운동에너지가 발생하게 되며, 이것은 부가수 질량 형태로 작용하게 된다. 따라서 접수구조물은 구조물의 질량과 유체에 의해 부가된 질량을 합하여 고유진동수를 계산해야 한다.

Fig. 1과 같이 단순 탱크의 측면 평판에 유체가 접할 경우 평

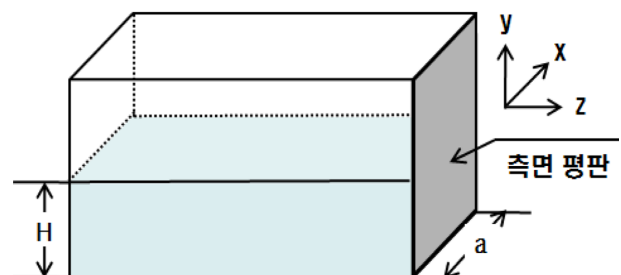


Fig. 1 The model of the fluid tank

[†] 교신저자 : smk1221@onestx.com, 055-548-3864

판에 가해지는 유체의 부가수 질량 효과를 계산하는 과정은 다음과 같다.

비압축성/비점성 이상유체에 대한 지배 방정식은 식(2)와 같다.

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

여기서 Φ 는 속도 포텐셜을 나타내며, 유체장에 적용되는 경계 조건에 의해서 계산 할 수 있다. Fig. 1에 나타난 측면 평판을 제외한 나머지 면을 강체로 가정하며, 벽면에서는 수직 방향의 속도가 0이 되고, 자유 수면에서는 포텐셜이 0이 되며, 측면 판과 접하고 있는 유체의 경우는 판과 같이 진동하는 것으로 가정 할 수 있다.

측면 평판에 작용하는 유체력은 속도 포텐셜에 Bernoulli's equation을 적용하여 계산 할 수 있으며, 식(3)과 같다.

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (3)$$

측면 판에 작용하는 유체력은 위에서 계산한 압력을 판의 면적에 대해 적분하여 식 (4)와 같이 계산 할 수 있다.

$$F_s = \int_0^H \int_0^a p \, dx dy \quad (4)$$

식 (4)에 의해 계산된 유체력 중에서, 가속도에 비례하는 항을 유체에 의해 판에 부가되는 질량의 항으로 나타내면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = M_f \ddot{x}(t) \quad (5)$$

지금까지 계산한 유체력에 의해 판에 부가되는 질량 M_f 를 유체 구조 상호작용으로 인한 운동방정식 (1)에 대입하면 식 (6)과 같다.

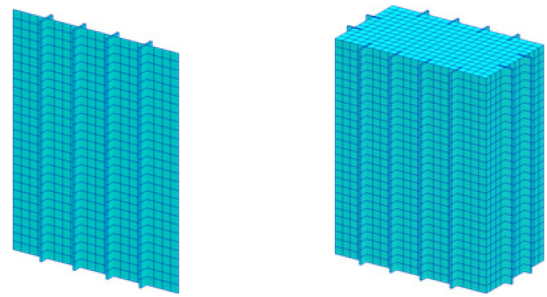
$$[M_s + M_f] \{ \ddot{X}(t) \} + [K_s] \{ X(t) \} = F_s(t) \quad (6)$$

3. 접수 진동 특성

3.1 무한유체장과 유한유체장의 진동해석

일반적으로 Fig. 2와 같이 무한유체장에 대한 해석은 이차원 모델을 사용하고 유한유체장은 삼차원 모델을 사용한다. 본 연구에서 사용한 해석 모델의 주요 정보는 Table 1에 나타내었다.

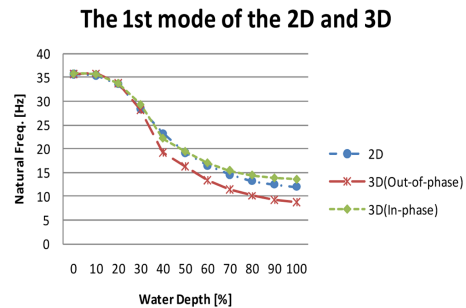
삼차원 모델(유한유체장)과 이차원 모델(무한유체장)에 대하여 접수 높이에 따른 고유진동수를 검토한 결과, Fig. 3에서 보는 바



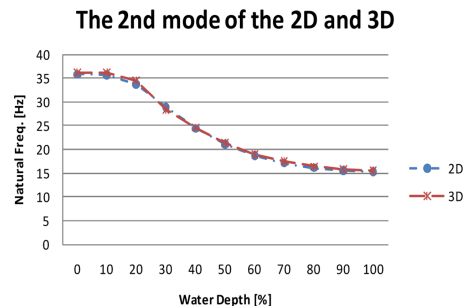
(a) Infinite fluid field model (2D) (b) finite fluid field model (3D)
Fig. 2 The F.E. model of the fluid tank

Table 1 The main particular of the fluid tank for F.E. model

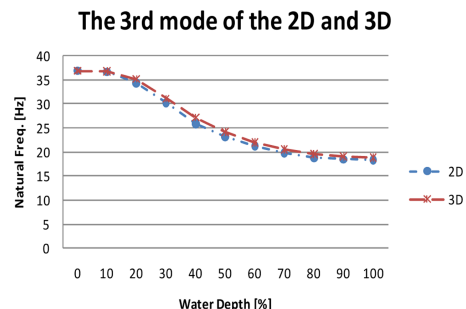
	B [mm]	D [mm]	L [mm]	Stiff.	Thickness [mm]	
					Side	Bottom & Top
Finite	4250	5500	-	400IA	12	20
Infinite	4250	5500	2400	400IA	12	20



(a) 1st mode



(b) 2nd mode



(c) 3rd mode

Fig. 3 The analysis result of the 2D and 3D model

와 같이 부가수 질량 효과에 의해 접수 높이가 높을수록 고유진동수가 낮아짐을 알 수 있다. 또한 삼차원 모델의 역위상 모드가 가장 낮은 고유진동수를 나타내며, 삼차원 모델의 동위상 모드와 이차원 모델의 1차 모드는 고유진동수가 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 2차 모드와 3차 모드에 대한 해석 결과, 이차원 모델과 삼차원 모델이 유사한 결과를 나타내었다. 주요 모드 형태는 Fig. 4~5에서 보는 바와 같다.

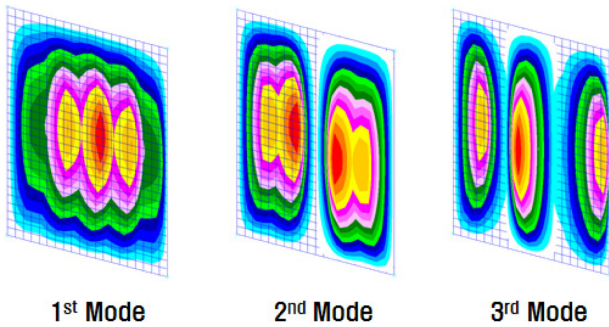


Fig. 4 The mode shape for the 2D model

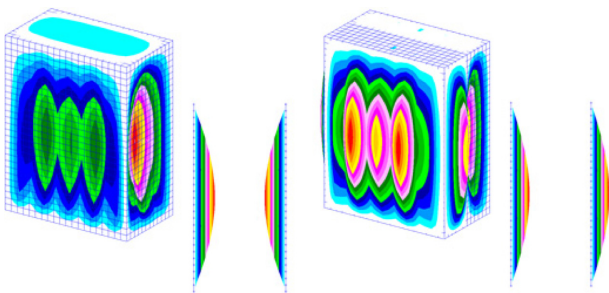


Fig. 5 The mode shape for the 3D model

3.2 유한유체장에 대한 진동응답해석

위에서 언급한 바와 같이 유한 유체장의 경우 역위상 모드와 동위상 모드가 나타나는데 측면 평판에 대한 모드를 살펴보면 그 모드 형상이 유사함을 알 수 있다. 따라서 역위상과 동위상 모드

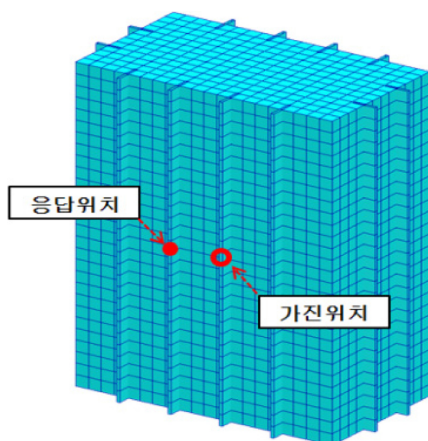


Fig. 6 The position of the excitation and response

에 대한 특성을 알아보기 위해 진동응답해석을 수행하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 측면 평판의 중앙부에서 가진을 하였으며, 이에 대한 진동응답해석을 수행하였다.

해석 결과, Fig. 7에서 보는 바와 같이 접수 수위가 높아짐에 따라 진동 응답이 상당히 낮아 짐을 알 수 있다. 접수 높이에 따라 고유진동수가 변하는 것을 고려하더라도 접수에 의한 감쇠가 매우 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 같은 접수 높이에서 역위상 모드의 응답이 동위상 모드의 응답보다 더 높게 나타난다.

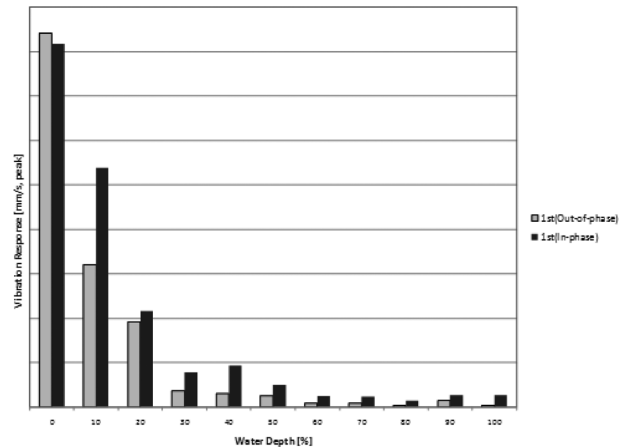


Fig. 7 The result of the FRF analysis

3.3 유체장 길이 변화에 따른 진동 특성

일반적으로 탱크 구조물의 형상은 일정하지 않기 때문에 탱크의 길이가 각각 다르며, 이에 따라 유체장의 길이가 달라지게 된다. 따라서 유체장의 길이 변화에 따른 측면 평판의 진동 특성을 알아 보았다. 해석 모델은 Fig. 8에 나타내었다.

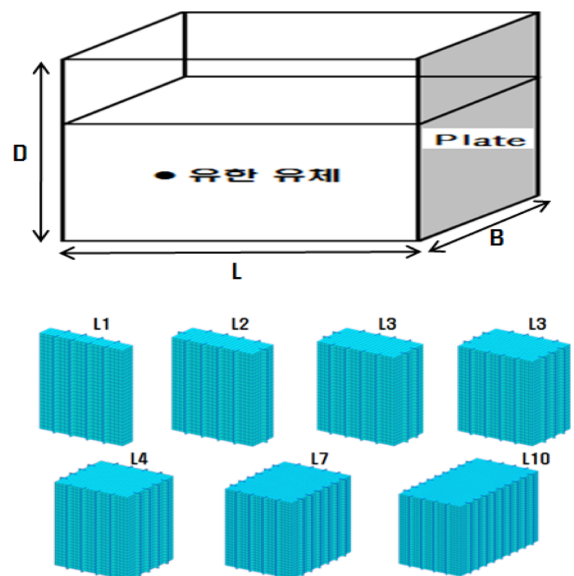


Fig. 8 The F.E model according to various length of fluid field

해석 결과, Fig. 9에서 보는 바와 같이 역위상 모드는 길이가 유체장의 길이가 길어짐에 따라 고유진동수가 증가하였으며, 이와 반대로 동위상 모드는 고유진동수가 낮아지며 무한 유체장의 1차 모드의 고유진동수와 유사하게 수렴함을 알 수 있다. 이러한 이유는 동위상 모드는 유체의 양과 관련되어 있고, 역위상 모드는 유체와 구조의 연성 효과와 관련되어 있기 때문이다. 다시 말해서 유체장의 길이가 길어짐에 따라 유체의 양은 증가되고 부가 수 질량 효과가 커지기 때문에 동위상 모드의 고유진동수는 낮아지지만, 유체와 구조의 연성효과는 감소하기 때문에 역위상 모드의 고유진동수는 증가하게 된다.

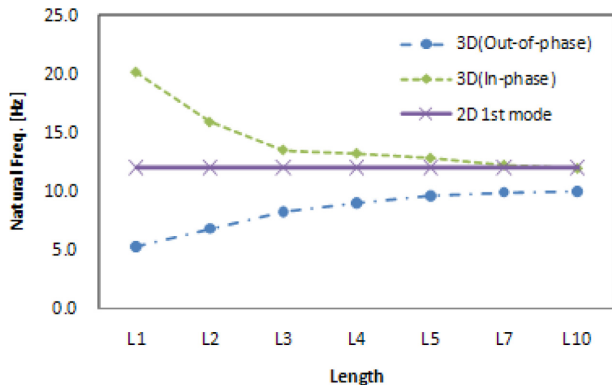


Fig. 9 The analysis result for the various tank length

4. 실선 진동 계측

4.1 청수 탱크 실선 진동 계측

탱크 구조물의 진동 특성을 바탕으로 실선 테스트를 통해 해석 결과와 비교를 하였다. 실험 대상은 간단한 사각형 탱크가 더욱 적합하나 시운전 이전에는 유체가 없을 뿐만 아니라 각종 절연체로 인해 실험이 불가하여 청수 탱크로 진행하였다.



Fig. 10 The picture of the fresh water tank (F.W.T.)

청수 탱크에 대해 모달 테스트를 수행한 결과는 Fig. 11과 같

다. 테스트 당시 주위 배경 소음으로 인해 여러 피크들이 존재하기 때문에 모드 분석을 통해 고유진동수를 검토한 결과 22.3Hz에서 청수 탱크의 고유진동수를 확인하였다.

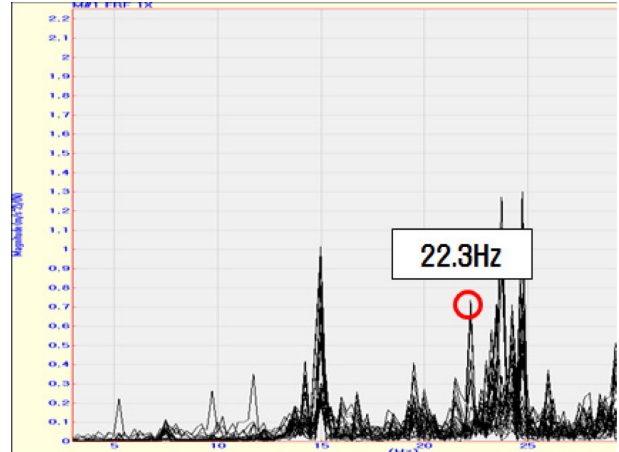


Fig. 11 The FRF result for the F.W.T.

4.2 청수 탱크 진동 해석

청수 탱크에 대한 실험 결과를 바탕으로 해석 결과와 비교 분석을 수행하였다. 진동 해석은 이차원 모델과 삼차원 모델로 각각 수행하였으며, 해석 모델과 결과는 Table 2와 Fig. 12~13에 나타내었다.

Table 2 The result of the vibration analysis for F.W.T.

	Mode	Natural Frequency
2D Model	1st	20.4 Hz
	2nd	27.0 Hz
	Out-of-phase	12.8 Hz
3D Model	In-phase	21.2 Hz
	2nd	28.0 Hz

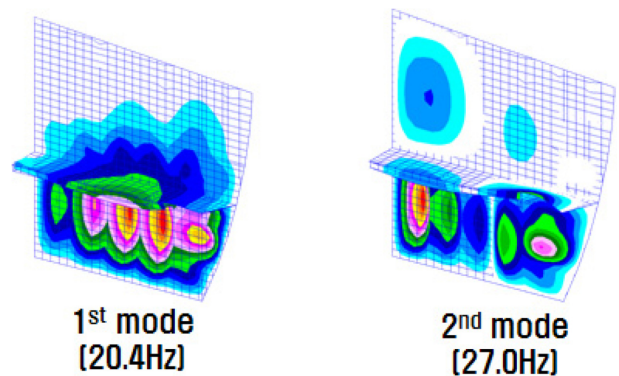


Fig. 12 The 2D F.E. model and mode shape for F.W.T.

위 해석 결과를 바탕으로 모드의 영향을 검토하기 위해 삼차원 모델을 이용하여 강제진동해석을 수행하였다. 해석 결과, Fig. 14

에서 보는 바와 같이 주요 피크는 21.2Hz에서 나타나며, 이는 고 유진동 해석 결과를 바탕으로 동위상 모드임을 알 수 있다. 그러나 역위상 모드(12.8Hz)는 관찰되지 않았다. 이러한 이유는 역위상 모드는 유체에 의한 감쇠 효과가 크기 때문에 나타나지 않은 것으로 판단된다.

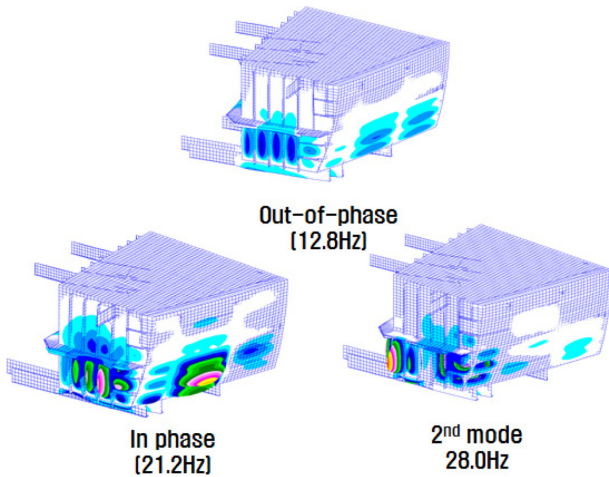


Fig. 13 The 3D F.E. model and mode shape for F.W.T.

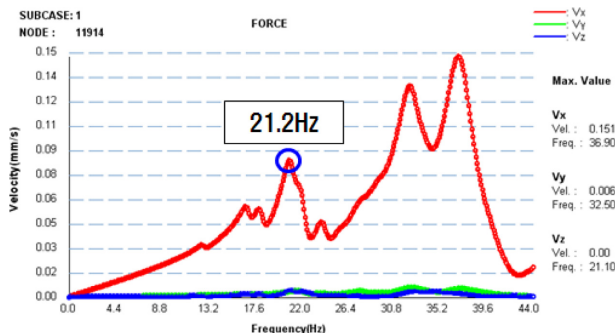


Fig. 14 The result of the FRF analysis for 3D model (F.W.T.)

5. 결론

본 연구 결과를 바탕으로 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유체 탱크는 접수 높이에 따라 부가수 질량 효과에 의해 고 유진동수가 낮아짐
- 2) 유한유체장에서는 역위상과 동위상 모드가 나타나는데, 역위상 모드가 동위상 보다 고유진동수가 낮게 나타나며, 동위상 모드는 무한 유체장의 1차 모드와 유사한 결과를 나타냄

3) 유체장 길이가 길어짐에 따라 유체의 양은 많아지고 유체와 구조의 연성 효과는 감소하게 되어 동위상 모드는 고유진동수가 감소하지만 역위상 모드는 반대로 증가하게 됨

4) 실선에서의 청수 탱크 진동 테스트와 해석을 비교 분석한 결과, 동위상 모드가 주요하게 나타나며 역위상 모드는 관찰되지 않음

본 연구를 통해 유체 탱크의 진동 특성을 알 수 있었으나, 실험을 통한 검증 부분은 보완되어야 할 것으로 판단된다. 추후 실제 선박 운항 시 진동 계측을 통한 유체 탱크의 진동 특성을 검토할 예정이다.

참고 문헌

Choi, S. H., 2002, Analytical and Experimental Study on Vibration Characteristics for Rectangular Tank Structure Filled with Fluid. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 195-203.

Kim, K. S., 2006, Case study on hydroelastic vibration of plate for various bounded fluid field. *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*.

Jeong, K. H., 2001, Free Vibration Analysis of Two Circular Plates Coupled with Bounded Fluid. *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 213-219.

Kim, K. C., 1978, The effect of the boundary condition on the added mass of a rectangular plate. *Journal of the society of naval architects of Korea*, Vol. 15, No. 2, June.

Jeong, K. H., 2004, Hydroelastic vibration of two identical rectangular plates, *Journal of sound and vibration* 272.

