

추가질량 모델에 의한 유체저장 탱크의 지진좌굴해석

Earthquake Buckling Analysis of Liquid Storage Tank by Added Mass Model

강 보 램* · 김 세 정** · 이 계 희***

Kang, Bo-Ram · Kim, Se-Jeong · Lee, Gye-Hee

요 약

본 연구에서는 유체가 담긴 원통형 유체저장탱크의 지진에 의한 좌굴을 수행하였다. 해석에 사용된 유체 저장탱크는 바닥이 앵커로 고정된 3차원 유한요소모델로 모델링 하였으며, 탱크 벽체와 지붕은 쉘 요소로, 지붕보강재는 프레임요소를 사용하여 모델링 하였다. 유체-탱크 모델은 Veletsos와 Shivakumar의 추가 질량법에 근거하여 지진에 의한 유체 압력은 탱크 벽에 수직으로 작용하도록 모델링 하였다. 2007년 일본에서 발생한 지진가속도를 사용하여 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS로 좌굴해석을 수행하였다.

keywords : 유체저장탱크, 좌굴, hydrodynamic added mass, 지진

1. 서 론

최근 지진에 관한 관심이 높아짐에 따라 구조물의 지진해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유체-구조물 상호작용으로 인하여 원통형 유체저장탱크에 작용하는 유체 동압력은 증폭되며 이러한 증폭된 유체 동압력을 받는 유체저장탱크는 탱크 자체의 파괴에 이르기도 한다. 특히 석유, 물, 액화가스 등을 저장하는 구조물은 지진발생시 손상, 파괴로 인해 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 저장물의 유출로 인한 환경파괴, 인명피해와 같은 2차적인 재해를 발생시키게 된다. 따라서 지진에 대한 유체저장구조물의 거동을 파악하는 방법의 필요성이 증대되고 있다.

2. 모델링

2.1. Tank 모델

본 논문의 대상구조물인 원통형 유체저장탱크는(그림 1) 높이 12.8m, 유체 높이 8.6m, 반경 7.5m이며, 높이 방향으로 7등분하여 탱크 벽의 두께를 4.5~9mm로, 탱크 벽과 지붕은 쉘 요소로, 지붕보강재는 빔 요소를 사용하여 모델링하였다. 탱크 바닥은 12개의 앵커로 완전히 고정된 것으로 모델링 하였다.

* 학생회원 · 목포해양대학교 해양건설시스템학과 석사과정 boram@mmu.ac.kr

** 학생회원 · 목포해양대학교 해양건설시스템학과 석사과정 bloodlight53@naver.com

*** 정회원 · 목포해양대학교 해양건설시스템학과 교수 lghlsk@mmu.ac.kr

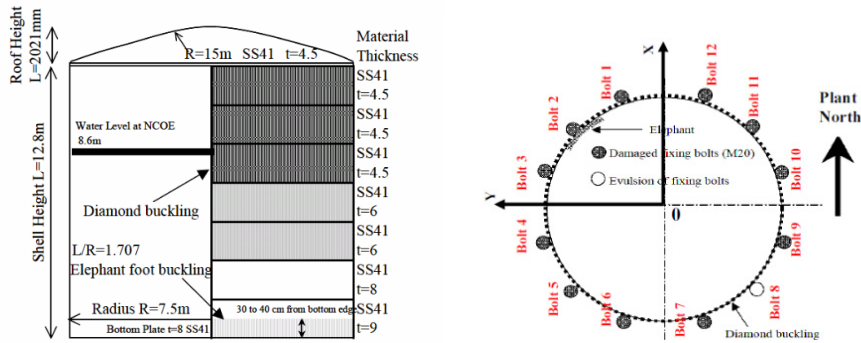


그림 1. 유체저장탱크 모델

2.2. 유체-탱크 모델

유체는 추가 질량법을 사용하여 모델링되었고, 유체압을 나타내는 질량은 Veletsos와 Shivakumar의 유체-탱크 시스템의 충동모드의 압력분포에서 얻는다. 압력분포는 강체로 된 유체-탱크 시스템의 강체 수평운동에 기인하며 식(1)과 같다.

$$P_i(\eta, \theta, t) = c_i(\eta) \rho R \ddot{x}_g(t) \cos \theta \quad (1)$$

P_i 는 충동 압력(impulsive pressure), η 는 무차원 좌표계 $=z/H_L$, z 는 탱크 바닥으로부터의 좌표, R 은 탱크 반경, $\ddot{x}_g(t)$ 는 지반 가속도, t 는 시간을 나타낸다. 함수 $c_i(\eta)$ 는 탱크의 높이를 따른 충동 압력(impulsive pressure) 분포이며, 식(2)로 계산한다.

$$c_i(\eta) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} C_{cn}(\eta) \quad (2)$$

$c_{cn}(\eta)$ 는 탱크의 높이를 따른 대류 압력(convective pressure) 분포로 정의되며 식(3)과 같다.

$$c_{cn}(\eta) = \frac{2}{\lambda_n^2 - 1} \frac{\cosh[\lambda_n(H/R)\eta]}{\cosh[\lambda_n(H/R)]} \quad (3)$$

매개변수 λ_n 은 Bessel 함수의 일계도함수 n 번째 해이며 본 해석에는 10개의 매개변수를 사용하였다. 일반적으로 3개항을 사용하면 충분히 정확한 값을 보이는 것으로 알려져 있다. 유체에 의한 압력은 탱크 벽에 수직으로만 작용하며 스프링으로 강결 되어있다(그림 3).

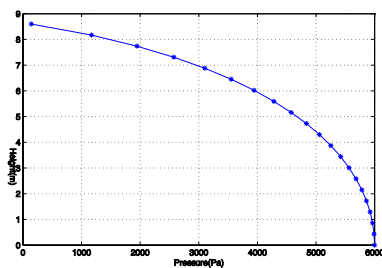


그림 2. 압력 분포($\ddot{x}_g = 1 m/s^2$)

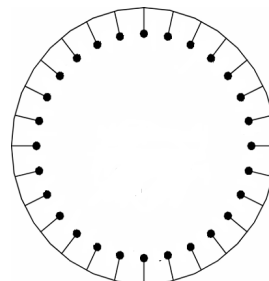


그림 3. 벽체에 작용하는 유체압

2.3. 지진 가속도

해석에 사용된 입력지진의 가속도 시간이력은 그림 2와 같다. 이 지진은 최대가속도가 X, Y, Z 방향 각각 $528.514\text{cm}/\text{sec}^2$, $889.754\text{cm}/\text{sec}^2$, $715.08\text{cm}/\text{sec}^2$ 이며, 진원의 깊이는 약 16km이고, 지진 규모는 6.6이다. 가속도의 지속시간은 30초이고, 해석에 고려된 시간은 15초였다.

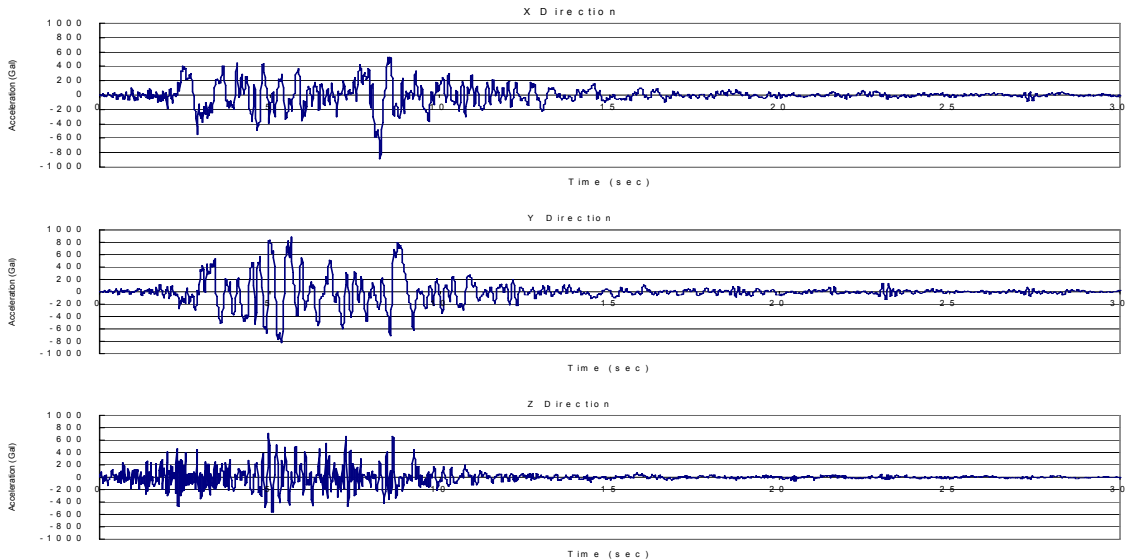


그림 4. 해석에 사용된 x, y, z 방향의 입력운동

3. 해석결과

지진해석을 수행한 결과 탱크 바닥에서의 수직방향 변위-시간 그래프는 그림 5와 같다.

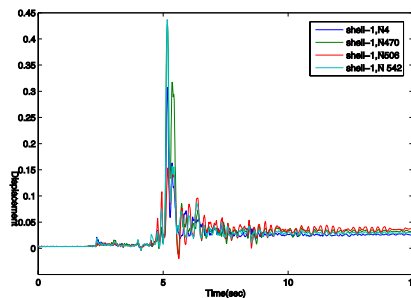


그림 5. 탱크 바닥에서의 변위 시간 그래프

2.34초에서 0.021m, 5.16초에서 0.437m의 변위가 발생하였고, 15초에서 0.03m의 좌굴 변형이 생긴 것을 확인하였다. 변위의 변화가 일어난 지점에서의 변형은 그림 6과 같으며, 탱크 벽체에 상족 좌굴(elephant foot buckling)로 인한 변형이 생긴 것을 확인할 수 있다.

탱크의 반경방향 변위-시간 그래프는 높이에 따라 차이가 있으나 대체적으로 변위의 증가는 2초, 5초에 일어난다(그림 7). 좌굴에 의한 변형(diamond shape buckling)은 탱크의 가운데 부분에서의 변형이 탱크의 상부, 하부에서보다 크게 발생한다(그림 8).

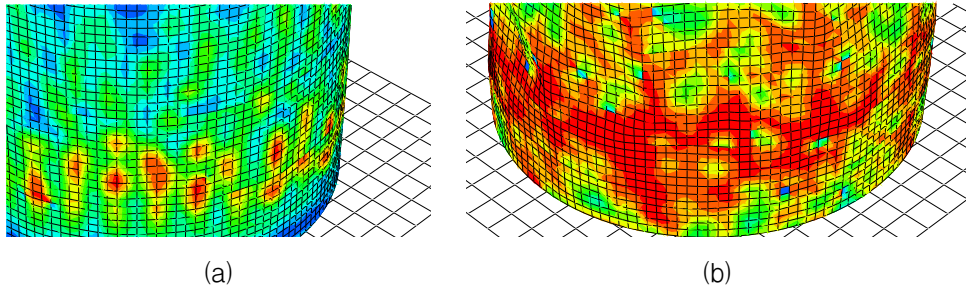


그림 6. Elephant foot buckling : (a) 2.24.sec, (b) 5.16sec

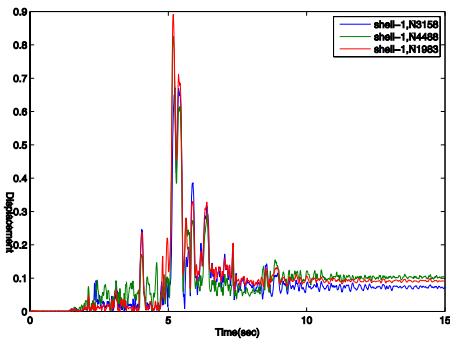


그림 7. 탱크 높이에 따른 변위-시간 그래프

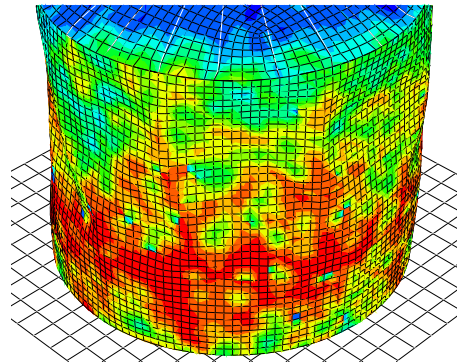


그림 8. Diamond shape buckling

4. 결론

본 연구에서는 비선형 동적해석을 통한 원통형 유체저장탱크의 지진좌굴 해석을 수행하였다. 해석결과 변위-시간 그래프에서 2.34초 지점에 변위 변화가 생기는데 이 지점을 좌굴이 일어나는 시점으로 생각할 수 있고, 2.34~5.16초 구간에서 생기는 변위는 탄성 좌굴, 5.16~15초 구간의 변위는 지진에 의한 좌굴 변형이 발생하였음을 확인할 수 있다. 추후 탱크의 반경, H/R, 수위의 영향이 탱크의 좌굴에 미치는 영향을 고려한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- 김승익 등(2000) 지진 하중을 받는 유체저장탱크 거동 연구에 관한 고찰, **대한토목공학회 논문집**, 20(4-A), pp.607~619
- 양태석 등(2007) 지진하중을 받는 고정된 원통형 유체저장탱크의 탄-소성 좌굴, **대한토목학회 정기학술대회**, pp.269~272
- J.C. Virella et al.(2006) Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation, *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), pp.521~531.
- Shivakumar Padmanaban(1996) Dynamic response of hazardous liquid-waste storage tanks used in nuclear facilities, Ph.D. thesis, Rice University.
- Anil K. Chopra(2005) 구조 동역학, 피어슨에듀케이션 코리아, Korea.
- ABAQUS V6.5 User's manual, HKC, (2005)