

유체저장탱크 단순화 모델의 정확도 향상을 위한 내진설계변수 산출

Accuracy Improvement of Simplified Liquid Storage Tanks Seismic Design

송수영* · 이강원** · 김준휘*** · 임윤묵****

Song, Sooyoung · Lee, Kang Won · Kim, Jun Hwi · Lim, Yun Mook

요약

유체저장탱크가 외부로부터 지진과 같은 동적하중을 받게 될 경우 유체와 구조물의 상호작용 (Fluid-Structure Interaction)으로 인하여 일반적인 구조물과는 상이한 거동을 보이게 된다. 이러한 복잡한 상호작용을 고려하여 현재 내진 설계에서는 Housner와 Haroun의 이론을 적용한 단순화 모델들이 사용되고 있다. 이들 모델은 유체의 거동을 대류(convective) 성분과 충격(impulsive) 성분으로 구분하여 집중질량으로 단순화 한다. 하지만 점차 대형화되고 있는 유체저장탱크의 정확한 동적 거동 특성을 파악하고, 지진하중과 같은 방향성을 가진 하중에 대한 구조물의 정확한 응답을 해석하려면 단순화 모델의 적용성 검토가 필요하다. 본 연구에서는 지진하중을 받는 유체저장탱크의 동적거동을 집중질량 모델과 3차원 모델을 이용하여 해석하였다. 나아가 해석결과의 차이를 분석하여 단순화 모델의 정확도 향상을 위한 내진설계변수 산출에 관하여 향후 연구방향을 제시하였다.

Keywords: 유체저장탱크, 유체-구조물 상호작용, 지진응답해석

1. 서론

유체저장탱크는 석유, LNG 등의 유체를 저장하는 중요한 사회기반시설이다. 저장탱크의 용량은 유체수요의 증가에 따른 시공관련 기술의 발전으로 인하여 점차 대형화되는 추세이다. 대형저장구조물의 파괴는 그 자체의 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 폭발, 화재 등으로 환경파괴나 인명피해와 같은 재해를 발생시킨다. 또한 최근 한반도에서 지진이 빈번하게 발생함에 따라 유체저장탱크의 내진해석에 대한 관심이 높아지고 있다. 지진과 같은 외부 동하중에 의한 유체저장탱크의 응답은 구조물의 독립적 거동으로 나타나는 것이 아니라 유체와 구조물의 접촉면을 통해 상호영향을 미치게 되어 그 양상이 복잡하게 된다(김승익, 2000). 그러므로 유체저장탱크의 보다 실질적인 동적 거동을 파악하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용 효과가 고려된 동적 해석이 실시되어야 한다(Cho, 2002). 하지만 현재 내진 설계에서 사용되는 집중질량 단순화 모델은 유체와 구조물의 상호작용 및 탱크 벽체의 유연성을 완벽하게 반영하고 있지 못하고, 대용량화 되어가는 저장탱크의 반지름의 증가 등으로 인하여 적용성이 점차 감소되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지진하중을 받는 유체저장탱크의 동적거동을 집중질량 모델과 3차원 모델을 통해 현재 단순화 모델의 문제점을 파악하여 정확도 향상을 위한 내진설계변수 산출에 관하여 향후 연구방향을 제시하였다.

* 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 석사과정 Email : swim329@yonsei.ac.kr

** 한국가스공사 연구개발원 선임 연구원 Email : kalee@kogas.re.kr

*** 한국가스공사 연구개발원 대리 Email : zzondse@kogas.or.kr

**** 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 부교수 Email : yunmook@yonsei.ac.kr

2. 유체저장탱크의 단순화 모델

2.1 Housner과 Haroun의 모델

Housner는 탱크 벽체가 강체라는 가정아래 유체성분을 수평지진하중에 의하여 자유표면의 거동에 포함되어 진동하는 대류 성분(convective part- m_c)과 지진에 의한 벽면의 수평운동과 함께 움직이는 충격 성분(impulsive part- m_i)으로 구분하였다. 즉, 각각의 성분에 대하여 등가의 집중질량과 등가스프링으로 단순화한 모델을 제시하였다. 그러나 이 모델은 벽체의 유연성을 고려하지 못하기 때문에 유체의 동수압을 과소평가하는 문제가 있다. 따라서 Haroun은 이러한 문제를 해결하기 위하여 그림 1과 같은 충격성분의 질량을 다시 지반에 의한 탱크 벽체의 변형에 의해 영향을 받는 부분(flexible impulsive part- m_{fi})과 지반의 가진에 직접 영향을 받는 부분(rigid impulsive part- m_{ri})으로 구분한 수정 모델을 제시하였다.

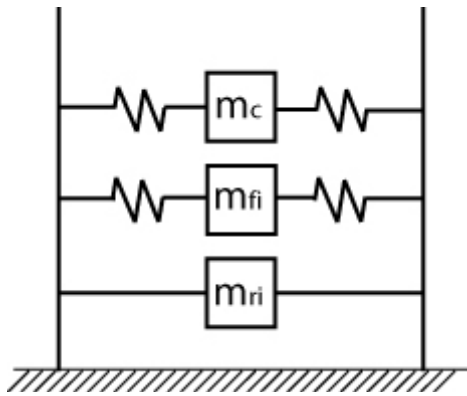


그림 1 Haroun의 모델

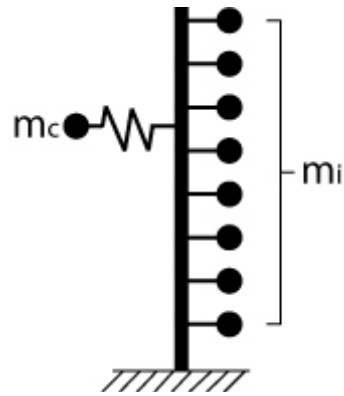


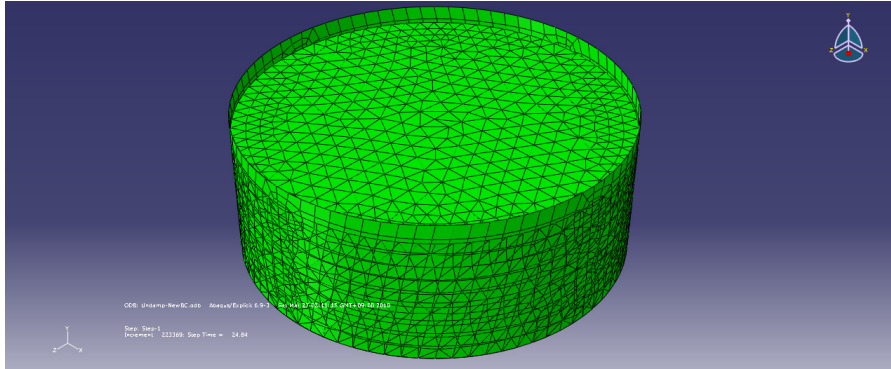
그림 2 집중질량 모델

2.2 집중질량 모델

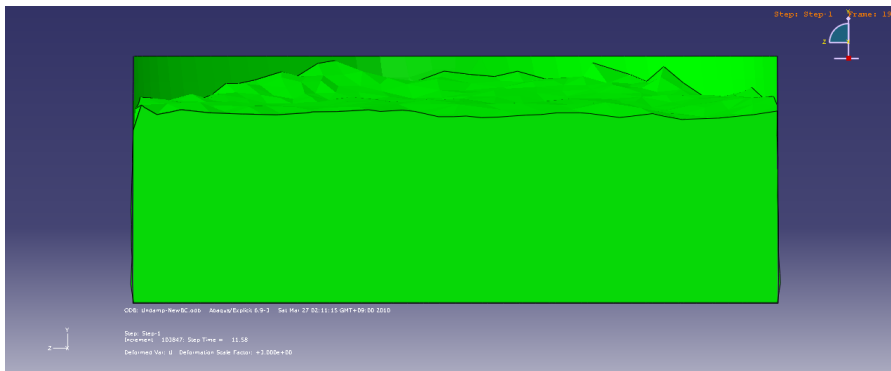
집중질량 모델은 유체성분에 대한 Housner 모델의 집중질량을 보요소의 각 절점에 그림 2와 같이 배분하여 유체와 구조물의 상호작용을 고려한다. 현재 내진설계 시 사용되며 캔틸레버 빔의 단면적, 탄성계수 및 포아송비와 같은 특성을 등을 이용하여 유체저장탱크를 얇은 뼈대구조물로 가정한다. 기존의 연구 결과에서 탱크의 높이와 반지름의 비가 큰 비교적 높은 탱크에서 그 결과가 어느 정도 타당함을 보인다(Jin 등, 2004).

3. 3차원 해석모델 및 지진해석 결과 비교

본 연구에서는 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 유체저장탱크를 집중질량 모델과 3차원 모델로 해석하였다(그림3). 3차원 모델링 시 유체의 물성치는 EOS(equations of state)옵션을 통해 적용하고 탱크 벽체에서 유연성을 고려하였다. 해석대상의 제원 및 물성치는 표 1과 같다. 이는 탱크의 대용량화로 인한 반지름의 증가를 고려하여 Haroun의 넓은 탱크(Haroun, 1983)로 선정하였다. 동적해석은 El Centro 지진의 NS방향 성분을 데이터로 사용하여 수행하였다.



(a) 3차원 해석대상 모델링



(b) 지진하중에 의한 유체 및 저장탱크의 거동
그림 3 Abaqus를 이용한 3차원 모델링 및 해석결과

표 1 해석 대상의 제원 및 물성치

제 원		단 위	값
구조물	반지름	m	18.30
	높이	m	12.20
	두께	m	0.0254
	밀도	kg/m ³	7840
	포아송비	-	0.3
	탄성계수	GPa	206.7
유체	높이	m	12.20
	밀도	kg/m ³	1000

유체저장탱크의 3차원 모델의 지진해석을 수행하고, 구조물의 6m 높이에서의 상대변위를 시간에 따라 측정한 결과는 그림 4와 같다. 최대변위는 0.00748m로 약 5.6초에서 나타난다. 이 결과는 Haroun의 이론해와 비교하였을 때 12% 정도의 오차를 갖는다. 하지만, 집중질량 모델에 대해서 해석을 수행한 결과에서는 이론적인 해에 비해 매우 작은 최대변위를 보인다. 표 2는 3차원 모델과 집중질량 모델, 그리고 이론적인 해에서 나타난 최대 상대변위를 정리한 것이다. 이 결과의 비교를 통해 실제 구조물의 단면 2차 모멘트를 집중질량 모델에 그대로 적용하는 단면 환산법이 높이와 반지름의 비가 작은 비교적 넓은 탱크의 경우에는 정확성의 한계를 확인할 수 있고, 이는 Jin 등(2004)의 연구와도 일맥상통한다. 따라서 넓은 탱크의 경우 집중질량 모델과 같은 단순화 모델 적용 시 단면 환산법에 대한 수정작업이 추가되어야 할 것이다.

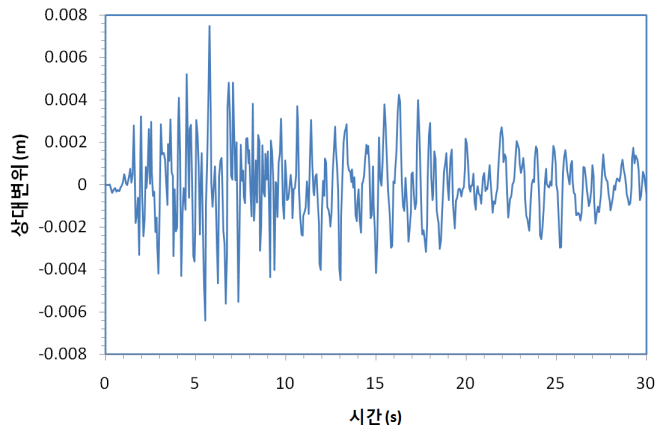


그림 4 3차원 해석 모델의 지진 상대변위 응답

표 2 해석모델의 다른 최대 상대변위 비교

	3차원 모델	집중질량 모델	Haroun 모델
최대 상대변위(m)	0.00748	0.000125	0.00658

4. 결론

본 연구에서는 지진하중을 받는 유체저장탱크의 집중질량 모델과 3차원 유한요소 모델의 해석을 수행하여 단순화 모델의 문제점을 파악하고 적용성을 검토하였다. 현재 집중질량 모델링 시 이론적인 해를 사용하여 집중질량의 크기를 계산하고, 강성은 실제 원통형 구조물을 토대로 산정된다. 원통형 구조물 강성의 크기는 유체저장탱크의 반지름에 큰 영향을 받는다. 저장탱크의 반지름이 커질수록 구조물의 강성이 증가하여 이론적인 집중질량에 비해 실제 강성이 크게 적용된다. 따라서 집중질량 모델의 강성 산정 시에 이론적으로 계산한 질량에 대한 고유진동수를 고려한 보안된 단면 환산법에 대하여 향후 연구들이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김승익 (2000) 지진 하중을 받는 유체저장탱크 거동 연구에 대한 고찰, **대한토목학회 논문집**, 20(4), pp.607~619.
- Cho, S.Y. (2002) *Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks Considering Liquid-Structure-Soil Interaction*, Ph. D. Thesis, Yonsei University.
- Haroun, M.A. (1983) Vibration studies and test of liquid storage tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, pp.179~206.
- Jin, B.M. 등 (2004) Earthquake Response Analysis of LNG Storage Tank by Axisymmetric Finite Element Model and Comparison to the Results of the Simple Model, *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada*, Paper No. 394.