

# 액체저장탱크의 지진응답해석 모델 중 빔 모델의 적용성

## Applicability of Beam Model among Earthquake Response Analysis Models of Liquid-Storage Tank

진 병 무<sup>\*</sup>    전 세 진<sup>\*\*</sup>    김 영 진<sup>\*\*\*</sup>  
 Jin, Byeong Moo    Jeon, Se Jin    Kim, Young Jin

### ABSTRACT

Generally, the time history analysis among seismic response analyses of a structure needs more times than static analysis. Therefore the mechanical model of a structure has been used as a simple lumped parameter model in time history analysis. For the most cases, the simple mechanical model shows the similar results to that of detailed finite element model, so it is reasonable to use the simple model in preliminary analysis. In seismic design of liquid storage tank, such as LNG storage tank, the lumped parameter model also is being used in preliminary analysis, however sometimes shows the differences to the results of detailed finite element model. Therefore in this study, the dynamic characteristics between lumped parameter model and detailed finite model is compared for the variables such as height/diameter of liquid-storage tank and thickness of wall, then the applicability of beam model to the seismic response analysis are evaluated for some liquid storage tanks.

### 1. 축대칭 구조물의 집중매개변수 모델 비교

일반적으로 그림1과 같은 원통형 구조물은 단순한 집중질량모델을 사용하여 모델링 한다. 이 구조물의 집중질량모델에 대한 강성행렬과 질량행렬은 요소의 단면적 A, 단면 2차 모멘트 I, 요소의 길이 L로부터 계산한다.

수평방향 지진하중이 작용하는 축대칭 구조물은 축대칭 유한요소(푸리에 급수=1)를 사용하여 모델링 하는 것이 일반적이다. 표1은 원통형 구조물의 높이 H, 반지름 R, 두께 t에 따라 축대칭 유한요소와 집중질량모델의 모드해석 결과를 정리한 것이다. 표1에서 전단-빔에 가까운 D=24 (D/L=1/5) 모델의 고유진동수가 전단을 고려한 빔 모델과 가장 잘 맞고, 이보다 t/R의 비가 작아질수록 축대칭 유한요소모델과 집중질량모델의 결과가 차이가 커짐을 알 수 있다.

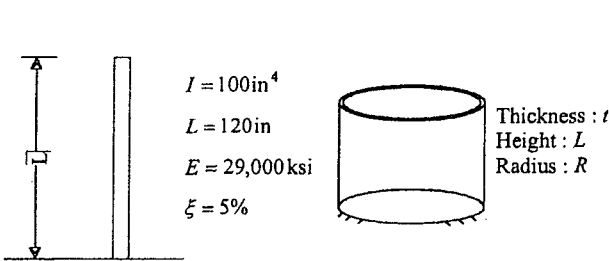


그림 1 원통형 구조물

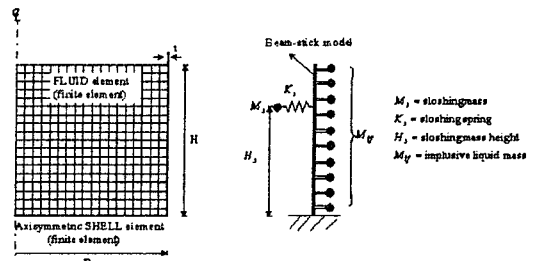
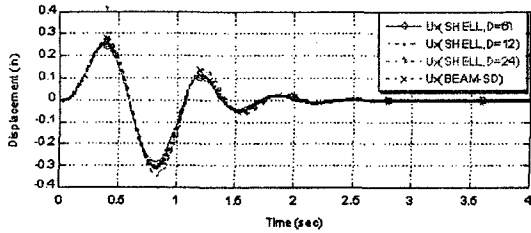


그림 2 액체저장탱크의 축대칭 유한요소모델과 집중질량모델

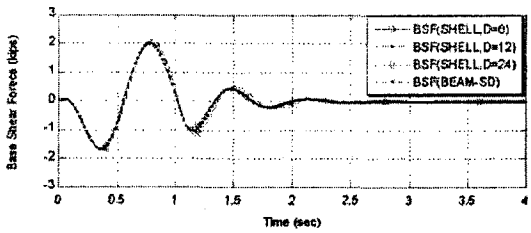
\*정회원, (주) 대우건설 기술연구소 토목연구팀, jinbm@dwconst.co.kr  
 \*\*정회원, (주) 대우건설 기술연구소 토목연구팀, jsj@dwconst.co.kr  
 \*\*\*정회원, (주) 대우건설 기술연구소 토목연구팀, kimyj@dwconst.co.kr

표 1 빔모델과 셸모델의 모드해석 결과

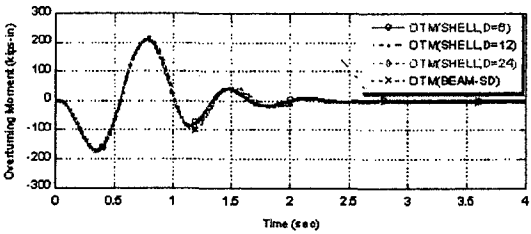
Diameter, $D$	Beam Model	Axisymmetric Shell Model					
		6	12	24	48	96	192
thickness, $t$	-	1.1789	0.1474	0.0184	0.0048	$2.8782e-4$	$3.5978e-5$
1	1.50	1.65	1.60	1.54	1.35	0.97	0.54
2	7.00	10.19	9.32	7.60	4.87	2.47	0.93
3	15.57	28.00	23.90	17.12	9.46	3.56	0.99



(a) Displacement

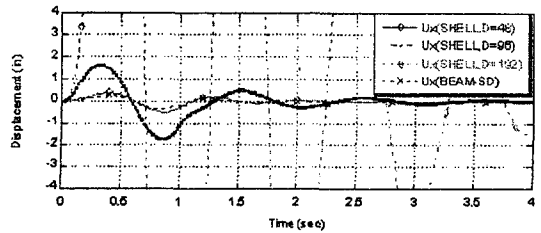


(b) Base Shear

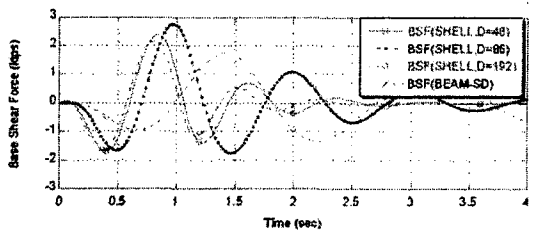


(c) Overturning Moment

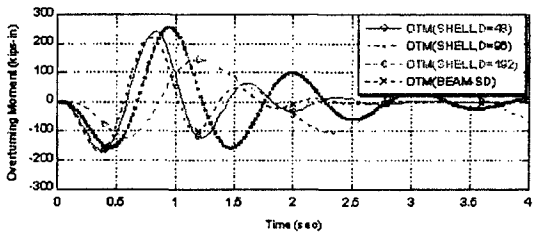
그림 3. 전단 빔 모델과 셸모델의 시간이력 응답의 비교 (D=6,12,24 and Shear Beam Model)



(a) Displacement



(b) Base Shear



(c) Overturning Moment

그림 4. 전단 빔 모델과 셸모델의 시간이력 응답의 비교 (D=48,96,192 and Shear Beam Model)

그림3과 4에는 그림1의 구조물에 대한 강제진동 해석결과이다,  $D \leq 24$ 인 경우, 전단 빔모델과 셸모델의 변위, 바닥전단력, 전도모멘트가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.  $D \geq 48$  인 경우 바닥전단력, 전도모멘트의 시간이력이 빔모델의 결과와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 특히 변위는 전단력 및 모멘트에 비하여 매우 큰 차이를 보이고 있다.

## 2. LNG저장 탱크의 모델링

지상식 완전방호식 LNG 저장탱크는 크게 9 % Ni 강으로 제작되는 내조와 PS 콘크리트의 외조로 이루어진다. 내조는

외조의 바닥 슬래브 위에 PBC(Perlite Concrete Block)와 DPC(Damp Proof Course), CGB(Cellular Glass Block), Glass Fiber, Dry sand 등으로 이루어진 단열재 위에 시공되어진다. 단열재 중에서 내조를 지지하는 구조적인 역할을 하는 것은 PBC이다. PBC는 압축강도 60kgf/cm<sup>2</sup>, 밀도 1000kg/m<sup>3</sup>의 경량형 콘크리트 블록으로 추정 탄성계수는 콘크리트의 1/10 수준이다. 그림 5에는 지상식 LNG 저장탱크의 대략적인 단면도를 나타내었다. 그림 6은 범용 유한요소 해석 프로그램 ANSYS를 사용하여 모형화한 LNG 저장탱크의 축대칭 유한요소 모델을 나타내었다.

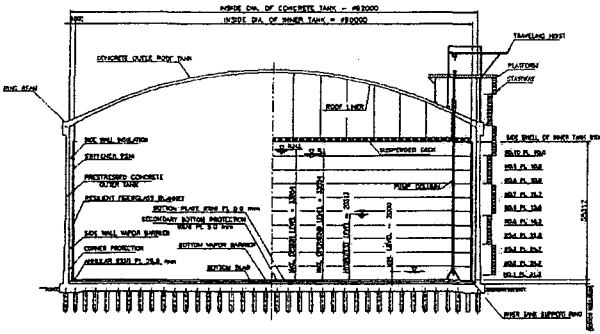


그림 5 20만㎥급 대용량 LNG 저장탱크의 개략도

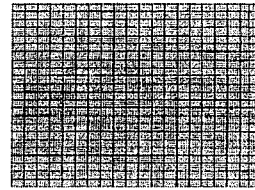


그림 6 LNG저장탱크의 축대칭 유한요소 모델

### 3. 액체저장탱크의 고유모드 해석

그림 2에 보인 바와 같이 액체저장탱크의 빔 모델과 축대칭 모델의 고유모드 해석을 수행한 결과를 표 2에 보이었다. 해석 대상은 지상식 인천10만, 통영14만 그리고 20만 kl LNG 저장 탱크 구조물[4]의 내조에 LNG가 만재되었을 경우와 Haroun[3]의 연구에 있는 높은 탱크, 넓은 탱크이다. 표2의  $f_{FSI,1}$  은 참고문헌[1]에 따라 계산한 유체-구조물 상호작용의 고유진동수이며,  $f_{FSI,ShearBeam}$  은 전단변형을 고려한 경우의 1번째 충격모드의 고유진동수이다.  $f_{FSI,ANSYS}$  는 유체 및 구조물을 축대칭 유한요소를 사용하여 모형화한 경우, 유체와 내조구조물의 상호작용 진동수이다.

충격성분의 고유진동수는 높은 탱크, 넓은 탱크의 경우 Haroun이 계산한 값과 축대칭 쉘모델을 사용하여 계산한 값( $f_{FSI,ANSYS}$ )이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

충격성분에 의한 유체-구조물 상호작용의 고유진동수는 전단변형을 고려한 빔 모델( $f_{FSI,ShearBeam}$ )의 경우 쉘 모델( $f_{FSI,ANSYS}$ )을 비교하면 높은 탱크의 경우 약 12%정도 높으며, 넓은 탱크의 경우는 2배에 이른다. 참고문헌[1]에 따라 계산한 빔 모델의 충격모드의 고유진동수( $f_{FSI,1}$ )는 쉘 모델에 비하여 약 6~12% 정도 상회하는 것을 확인할 수 있다.

표 2 액체저장시설의 기본진동수 비교

	인천10만 (내조)	통영14만 (내조)	20만 (내조)	Tall Tank	Broad Tank
H (m)	29.9	27.68	33.854	21.96	12.2
D (m)	68.0	84.0	90.0	14.64	36.6
H/D	0.4397	0.3295	0.3762	1.5	0.3333
$\rho_{liquid}$ (kg/m <sup>3</sup> )	480	480	480	1000	1000
$\rho_{structure}$ (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850	7850	7850	7850
$E_{structure}$ (N/m <sup>2</sup> )	200x10 <sup>9</sup>	200x10 <sup>9</sup>	200x10 <sup>9</sup>	207x10 <sup>9</sup>	207x10 <sup>9</sup>
t' (m) at 1/3H	0.0165	0.0185	0.0247	0.0254	0.0254
$f_{FSI,1}$ (Hz)	2.388(8% ↑)	2.300(12% ↑)	2.168(10% ↑)	5.228(0% ↓)	6.515(6% ↑)
$f_{FSI,ShearBeam}$				5.92(12% ↑)	12.38(102% ↑)
$f_{FSI,ANSYS}$ (Hz)	2.214	2.048	1.979	5.27 (5.292 <sup>(3)</sup> )	6.12 (6.173 <sup>(3)</sup> )
$f_{str,beam}$ (Hz)	20.23(22% ↑)	20.63(31% ↑)	17.72(23% ↑)	23.00(20% ↑)	44.62(31% ↑)
$f_{str,shell}$ (Hz)	16.58	15.73	14.08	19.17	33.99
$f_{sloshing,2}$ (Hz)	0.1115	0.0955	0.0946	0.2499	0.1451
$f_{sloshing,ANSYS}$ (Hz)	0.1113	0.0955	0.0945	0.2494	0.1450

구조물 자체의 1번째 수평방향 변형의 고유진동수의 경우 전단변형을 고려한 빔 모델( $f_{str, beam}$ )은 셸 모델( $f_{str, shell}$ )에 비하여 약 20-30% 정도 높게 계산되었다.

실제 시공되는 LNG 저장탱크의 내조는 보강링(stiffener ring) 등이 설치되어 좌굴 등의 안전성을 확보하는데, 보강링에 의해 구속되어 단면의 변형이 없다고 가정한 경우, 셸 모델과 전단변형을 고려한 빔 모델의 제1 고유진동수는 거의 일치한다. 표 3에는 높은 탱크와 넓은 탱크에 대하여 빔 모델과 셸 모델에 대하여 고유진동수를 비교하여 나타내었다. 보강링에 의하여 내조의 단면변형이 거의 없는 경우, 내조를 전단 빔 요소로 모델링하는 것은 타당하다고 할 수 있다. 표 4에는 통영 14만kl 탱크에 대하여 보강링의 유무에 따라 내조구조물의 상세유한요소해석을 수행하여 고유진동수를 정리하였다. 표4로부터 보강링의 효과는 거의 없는 것으로 판단된다. 액체슬러시의 고유주기는 이론적인 해[2]에 의한 결과와 축대칭 유체요소 모델의 결과가 일치하는 것을 알 수 있다. 그러므로 저장 액체의 유한요소 모델은 타당하다고 할 수 있다.

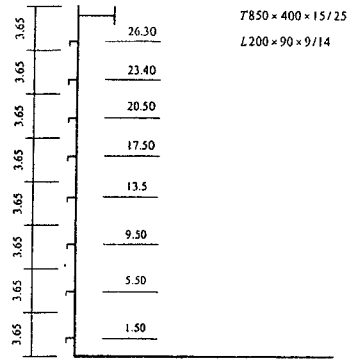


그림 7. 통영 14만 kl 탱크 내조의 형상 및 보강링

표 3 빔 모델, 셸 모델에 따른 고유진동수 비교 (단위: Hz)

Mode No.	Tall Tank[3]				Broad Tank[3]			
	Beam Model		Shell Model		Beam Model		Shell Model	
	Shear Beam	Ref[1]	Shell Model	Constrained	Shear Beam	Ref[1]	Shell Model	Constrained
1	19.46	18.54	19.17	19.87	45.30	23.031	33.99	45.00
2	55.90	53.23	56.00	55.97	104.98	71.99	43.76	109.56
3	98.37	92.10	85.79	99.19	141.14	105.24	44.38	141.09

표 4. 통영 14만kl 탱크의 고유진동수 (단위: Hz)

Mode No	w/o Stiffener Ring	w/ Stiffener Ring
	-	5.487
1	15.998	15.282
2	18.979	18.873
3	19.301	19.263

#### 4. 결론

이 연구에서는 액체저장탱크의 빔 모델과 유한요소 모델(축대칭 셸요소 및 축대칭 유체요소)의 고유 해석을 수행하여 빔 요소 모델의 적용성을 평가하였다. 빔 모델은 단면의 변형이 거의 없는 t/D 비가 비교적 큰 탱크나, 높이와 반지름의 비(H/R)가 비교적 작지 않은 구조물에 적용할 때 그 결과가 어느 정도 타당함을 보인다. 인천 10만, 통영 14만 kl 등 LNG 저장탱크 내조 구조물의 경우, 빔 모델은 셸 모델에 비하여 구조물의 고유진동수 및 충격모드의 진동수를 실제 값보다 크게 산정하고 있다. 그러므로 빔 모델을 사용하여 축대칭 액체저장탱크의 내진해석 또는 설계의 예비단계에서 활용하는 것은 시간 또는 경제적으로 비용을 절약할 수 있어 권장할 만하나, 상세 유한요소 모델과 다른 결과를 도출할 수 있음을 주의하여야 하겠다.

#### 참고문헌

1. TID-7024, U.S., "Nuclear Reactors and Earthquakes", Chapter 6, Dynamic Pressure on Fluid Containers, Atlantic Energy Commission Publication.
2. Shibata, T., Sogabe, K. and Shigeta, T. (1976), On The Aseismic Design of Liquid Storages, *Bulletin of JSME*, Vol.19, No.138, pp.1467-1477.
3. Haroun, M.A. (1983), "Vibration Studies and Test of Liquid Storage Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.11. pp.179-206.
4. Daewoo Institute of Construction Technology (2004), *Design of Above-ground LNG Storage Tank with 200,000 kl Capacity*.