

직사각형 액체저장탱크의 동적 응답특성에 관한 진동대 실험

Shaking Table Test of a Rectangular Liquid Storage Tank

김재관¹⁾

Kim, Jae Kwan

박진용²⁾

Park, Jin Yong

ABSTRACT

Shaking table tests were performed to investigate dynamic behavior of a three dimensional flexible rectangular liquid storage tank. Response characteristics to the three components of translational motion and three component of rotational motion were studied. The aluminium tank was exposed to the shaking high enough to make it behave in nonlinear range. Only very limited amount of the data have been processed yet. Very interesting phenomena on the effects of non-symmetry have been observed and presented. Test results that show nonlinear behavior under the high intensity shaking are reported.

1. 서론

액체 저장에는 원통형 탱크가 널리 사용되고 있는 까닭에 액체 저장탱크의 지진 응답에 관한 연구도 주로 원통형 저장탱크를 대상으로 한 것이 주종을 이루고 있다 (Haroun, 1983; Haroun 과 Housner, 1981a, b; Haroun 과 Ellaithy, 1985; Veletsos, 1984; Veletsos 와 Tang, 1986; Veletsos와 Tang, 1990; Rammerstorfer 등, 1990). 그러나 직사각형 평면을 갖는 대형 액체 저장탱크에 관한 연구는 드물고, 그나마, 구조물을 강체로 가정한 것이었다 (Haroun, 1984; Housner, 1957). 최근에 들어서 구조물의 유연성을 고려한 유체-구조물 상호작용이 직사각형 평면의 액체 저장탱크의 지진 응답에 미치는 영향을 일부 연구자들이 규명하고 있으나 (Kim 등, 1996; Koh 등, 1998) 비선형 영역에서의 거동특성에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 알루미늄 재질의 직사각형 평면 액체 저장탱크의 축소모델을 제작하여 이를 강한 세기의 진동으로 흔들어서 선형뿐 아니라 비선형 영역에서의 응답특성을 조사하여 보았다. 본 논문에서는 극히 제한된 범위에서 실험 결과를 제시하였고 현상을 해석하려고 시도하였다.

2. 실험모델 및 계측 시스템의 구성

그림 1에는 진동대 위에 설치된 탱크 모델 사진이 수록되어 있다. 탱크 모델의 기하 형상과 치

1) 서울대학교 부교수, 정회원

2) 서울대학교 박사과정, 학생회원

수 및 좌표계의 정의는 그림 2에 제공되었다. 표 1에는 재료 성질에 관한 data를 수록하였다. 그림 3에는 실험시 응답을 측정하기 위해서 설치된 계측기의 종류별 위치를 표시하였다.

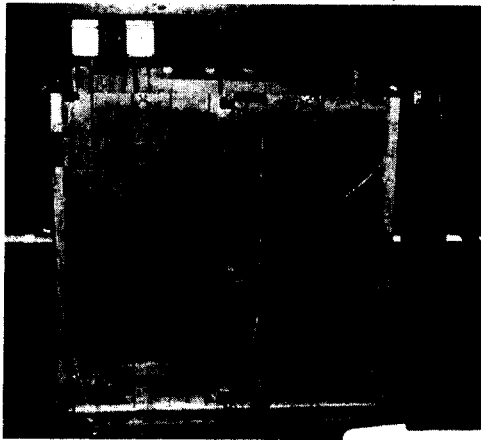


그림 1. 모델의 실물사진

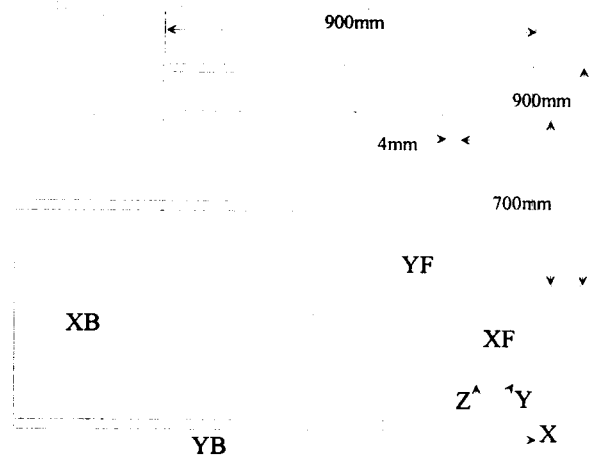
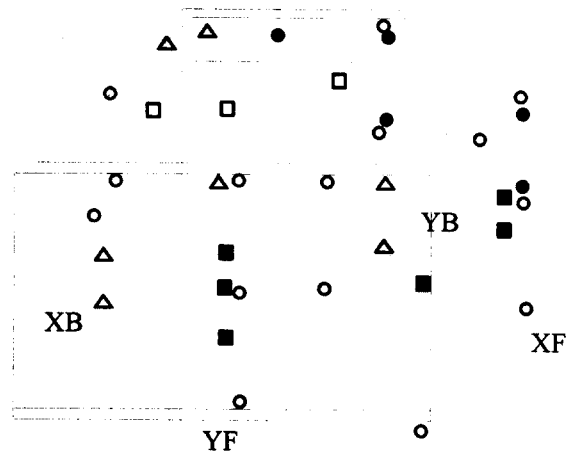


그림 2 모델의 기하 형상과 치수, 좌표계

표 1. 알루미늄 모델의 중량, 재료 특성

중량	
내부유체	378 kg
알루미늄 모델	약 45 kg
총중량	약 430 kg
재료 특성	
탄성계수	$70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
밀도	2700 kg/m^3
Poisson's ratio	0.33



△: Strain gauge, ○: Accelerometer, ●: LVDT
 ■: Pressure gauge, □: Wave height gauge

그림 3. 계측 시스템의 구성

3. 실험결과

실험은 대덕 연구단지 소재 한국기계연구원의 6-자유도 진동대를 사용하여 수행하였다. 표 2에는 이 진동대의 성능이 제공되어 있다. 입력 하중으로는 Random White Noise와 Taft Earthquake Accelerogram(1952, PGA=0.176g)을 사용하였다. Taft 하중의 경우, 진동대의 규격 및 구조물의 고유 진동수 등을 고려하여 시간 상사를 3을 적용하였다. 실제 지진 시에 액체저장탱크에 발생할 수 있는 3차원적 거동특성을 구명하기 위해서, Random White Noise의 경우 x, y, z방향의 수평, 수직과 회전 운동(pitch, roll, yaw)의 6가지 운동에 대해서 실험하였고 Taft 하중의 경우, 수평, 수직

이외에 xy, yz, zx, 그리고 xyz의 3차원 운동에 대해서 응답을 조사하였다. 그림 4에는 실제 시험중인 탱크의 사진을 수록하였다. 그림 5에서는 Taft 지진 입력하중이 y축 방향으로 작용한다고 할 때, 장변 벽체의 중앙부 중간 위치에서의 변위, 수압의 시간이력을 입력가속도 시간이력과 비교하였다.

표 2. 진동대의 유효성능

Specification	Performance
Max. Load	30ton
Table Dimension	4.0m × 4.0m
Vibration Directions	3 Translations, 3 Rotations
Max. Displacement	H= ±100mm, V= ±50mm
Max. Velocity	H= 75m/sec, V= 50m/sec
Max. Acceleration	H= 1.5g, V=1.0g
Max. Frequency	50Hz
Servo System	Electrohydraulic Servo
Control Mode	Analog/Digital Control
Channels	56

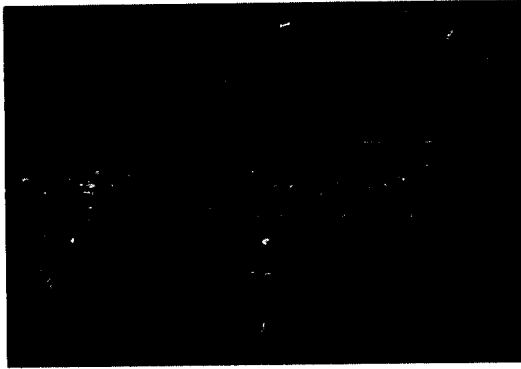


그림 4. 실험중인 탱크모델 에

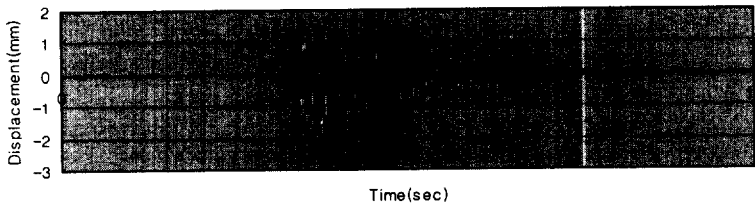


그림 5a. 장변벽체 중앙부 중단에서의 변위

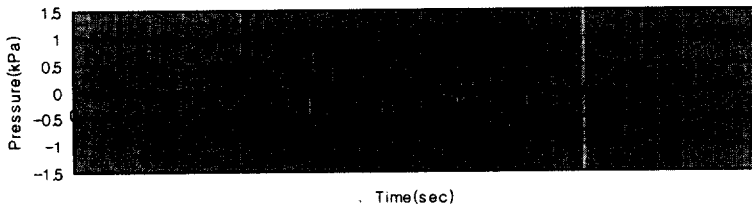


그림 5b. 장변벽체 중앙부 중단에서의 수압

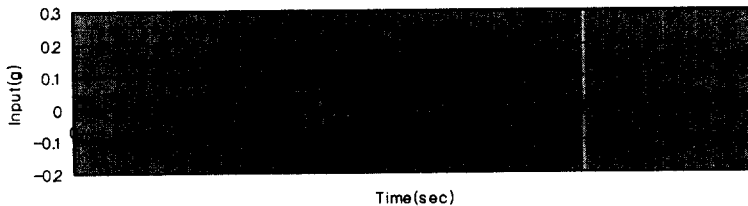


그림 5c. Taft 지진 입력하중(Peak=0.2g)

그림 6은 Random White Noise 입력운동에 대해 각각의 가속도에 대한 전달함수를 나타낸 것이다.

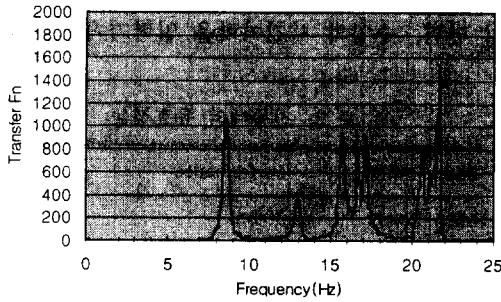


그림 6a. 수직운동에서 장변 벽체(YB) 중앙부 가속도의 전달함수

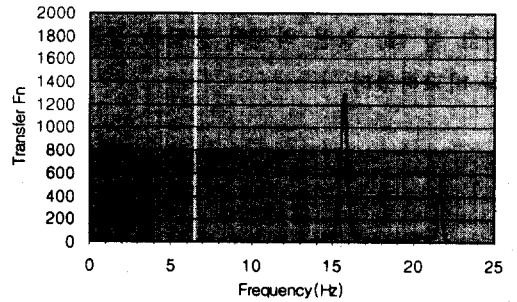


그림 6b. 수직운동에서 단변 벽체(XF) 중앙부 가속도의 전달함수

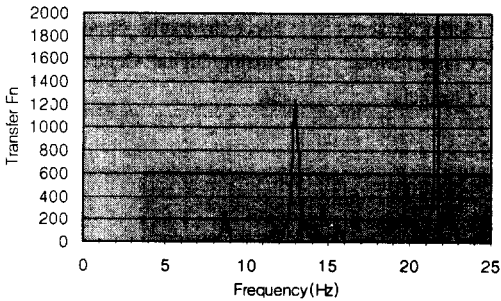


그림 6c. y축방향 병진운동에서 장변 벽체(YB) 중앙부 가속도의 전달함수

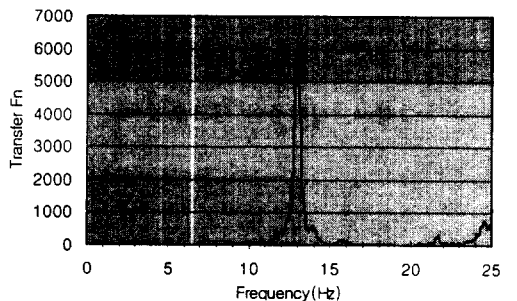


그림 6d. y축방향 병진운동에서 반대편 장변 벽체(YF) 중앙부 가속도의 전달함수

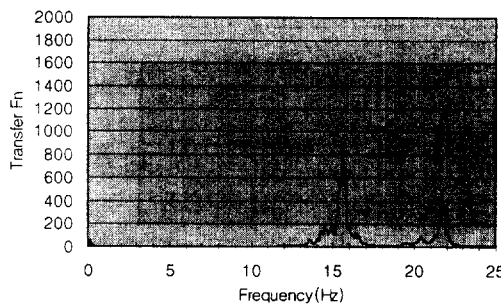


그림 6e. x축방향 병진운동에서 단변 벽체(XF) 중앙부 가속도의 전달함수

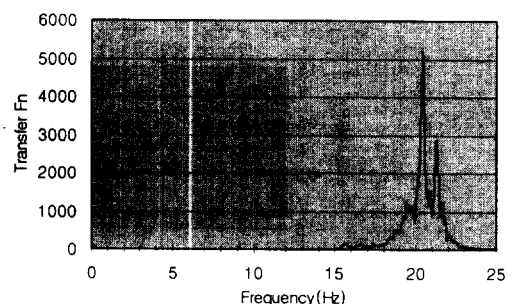


그림 6f. x축방향 병진운동에서 반대편 단변 벽체(XB) 중앙부 가속도의 전달함수

수치해석을 통해서 구한 고유진동수는 최저차 모드부터 12.095, 19.783, 32.185이다. 제 1차 모드는 Breathing 모드로서 그림 6a에서 관찰되는 진동수가 8.618 Hz에 비교된다. 제 2차 모드는 y 축 방향으로의 병진을 지배하는 모드로서 그림 6c에서 관찰되는 진동수가 12.939 Hz인 모드이다. 그리고 제 3차 모드는 그림 6f에서 관찰할 수 있는 진동수가 20.422 Hz인 모드이다. 모드가 모두 확인되지 않았지만 매우 흥미로운 현상이 발견되었다. 모델은 주축에 대하여 형상과 탄성 특성이 대칭이 되도록 설계되었다. 그렇다면 그림 6c에 주어진 y축 방향 운동에 대한 응답에서는 제 1차

모드가 나타나지 않아야 한다. 그럼에도 불구하고 실제 실험결과에서는 Breathing 모드가 발견되는 것은 장변이 대칭이 아니라는 것을 의미한다고 생각된다. 그 역도 성립을 한다. 즉 그림 6a에서 13 Hz 근처에서 y축 방향 병진 모드가 나타나는데 이는 곧 완전한 대칭성이 성립하지 않고 있다는 사실을 의미한다고 하겠다.

Time Scale이 적용된 Taft 지진기록의 세기를 높여가면서 탱크의 응답특성에 관한 조사를 실시하였다. 그림 7에는 y축 방향으로 작용하는 병진운동에 대한 장변벽체 중앙부에서의 가속도 응답에 대한 전달함수가 도시되어 있다. 표 3에는 제 2차 모드, 즉, y축 방향으로의 병진모드의 고유진동수 변화가 수록되어 있다. 알 수 있는 바와 같이 PGA=0.8G까지는 거의 선형성을 유지하였으나 그 다음 단계부터는 탄성거동을 상실하였음을 보여준다.

표 3. 병진모드의 Peak 값과 Frequency

PGA(g)	0.2	0.4	0.6	0.8
Frequency	12.891	12.840	12.793	12.744
Peak 값	1471.41	552.43	531.81	591.42

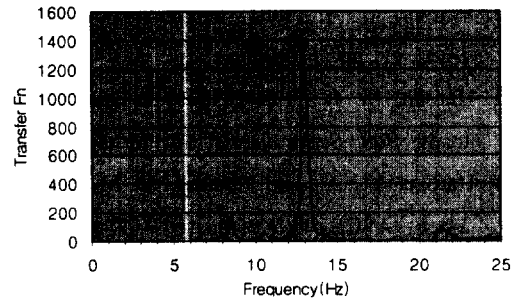


그림7a. PGA=0.2g일 때 전달함수

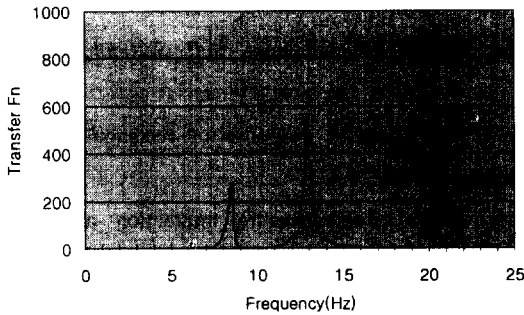


그림7b. PGA=0.4g일 때 전달함수

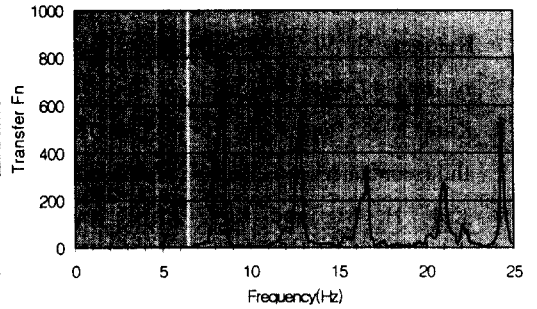


그림7c. PGA=0.6g일 때 전달함수

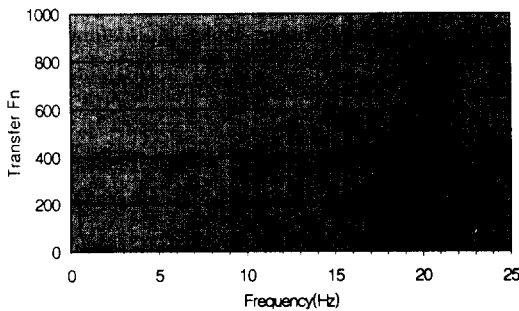


그림7d. PGA=0.8g일 때 전달함수

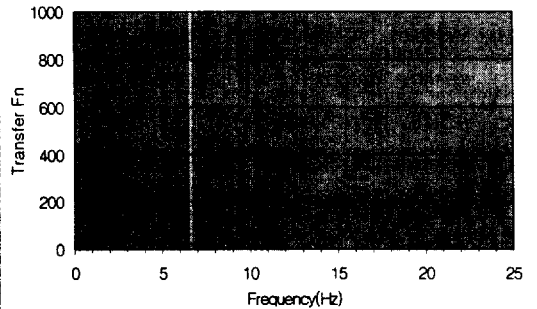


그림 7e. PGA=1.0g일 때 전달함수

5. 결론

원통형 액체저장탱크에 비해서 그 연구와 실험결과가 비교적 부족했던 직사각형 액체저장탱크에 대하여 진동대 실험을 행하였다. 이러한 실험 data는 특히 비대칭성의 영향과 비선형 거동에 대한 많은 정보를 갖고 있다고 생각된다. 따라서 data 처리와 해석이 완료되면 직사각형 수조구조물의 지진거동특성의 많은 부분을 해명할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Clough, R. W., and Penzien, J. (1993). *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc.
2. Haroun, M. A. (1983) Vibration studies and test of liquid storage tanks, *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 11, pp. 179-206.
3. Haroun, M. A. (1984) Stress analysis of rectangular walls under seismically induced hydrodynamic loads, *Bull. Seismological Soc. of Am.*, 74(3), pp. 1031-1041.
4. Haroun, M. A., and Ellaithy, H. M. (1985) Model for flexible tanks undergoing rocking, *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 111(2), pp. 143-157.
5. Haroun, M. A., and Housner. G. W. (1981a) Earthquake response of deformable liquid storage tanks, *J. Appl. Mech.*, 48, pp. 411-418.
6. Haroun, M. A., and Housner. G. W. (1981b) Seismic Design of liquid storage tanks, *J. Tech. Councils*, ASCE, Vol 107, pp. 191-207.
7. Housner, G. W. (1957) Dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bull. Seismological Soc. of Am.*, 47, pp. 15-35.
8. Kim, J. K., and Koh, H. M., and Kwahk, I. J. (1996) Dynamic response of rectangular flexible fluid containers, *J. Engrg. Mech.*, ASCE, 122(9), pp. 807-817.
9. Koh, H. M., and Kim, J. K., and Park, J.-H. (1998) Fluid-structure interaction analysis of 3-Rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results, *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, Vol. 27, pp. 109-124.
10. Rammerstorfer, F. G., Sharf, K., and Fisher, F. D. (1990) Storage tanks under earthquake loading, *Appl. Mech. Rev.*, 43, pp. 261-282.
11. Veletsos, A. S. (1984) Seismic response and design of liquid storage tanks, *Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems*, Tech. Council on Lifeline Earthquake Engrg., ASCE, New York, N. Y., pp. 255-370.
12. Veletsos, A. S., and Tang, Y. (1986) Dynamics of vertically excited liquid storage tanks, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 112(6), pp. 1228-1246.
13. Veletsos, A. S., and Tang, Y. (1990) Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks, *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 19, pp. 473-496.