

사각형 면진유체저장조의 진동대실험

Shaking Table Test of Rectangular Liquid Container with Base-Isolation System

전 영 선*

Choun, Young-Sun

최 인 길*

Choi, In-Kil

ABSTRACT

The seismic behavior of a rectangular liquid container with high damping laminated rubber bearing is investigated through the scaled model tests. The results are compared with those for non-isolated model, and those by analytical methods. It is shown that the optimum dynamic properties of isolation system can reduce the acceleration response in the superstructure significantly and prevent the amplification of sloshing height.

1. 서 론

원자력관련 구조물의 구조적 안전성 확보는 공공의 건강과 안전을 위해 매우 중요하다. 사용후핵연료 저장조는 운영기간중 설계지진에 대하여 저장조 자체의 구조적 안전성은 물론 내부에 저장된 사용후핵연료 및 저장용기의 안전성을 보장할 수 있어야 한다. 사용후핵연료 저장조와 같은 유체저장구조물에 면진장치를 사용하면 저장된 유체에 의해 발생하는 동압력을 감소시키고 그에 따라 구조물의 안전성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다[1].

본 연구에서는 고감쇠 적층고무베어링(High Damping Laminated Rubber Bearing)을 사용한 유체저장조의 지진시 거동을 축소모델의 진동대 실험을 통하여 파악하였다. 또한 면진장치의 효과를 알아보기 위하여 면진장치를 사용하지 않은 수조와 면진장치를 부착한 수조에 대하여 각각 동일한 실험을 수행하였다. 실험결과를 분석함으로써 면진 및 비면진 수조의 거동을 비교·평가하였으며 지금까지 개발한 면진수조의 지진해석 프로그램의 결과와도 비교함으로써 수치해석방법의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 축소모델실험

2.1 축소모델

진동대 실험을 수행하기 위한 수조의 축소모델의 제원은 사용할 진동대의 성능, 모델의 재료특성치, 예비해석결과 등을 고려하여 결정하였다.

* 정회원, 한국원자력연구소 선임연구원

수조의 축소모델은 원래의 수조와 기하학적 상사성을 유지하지만 재료의 특성은 상사성을 갖지 않는 균질한 탄성재료로써 제작하였다. 축소모델의 재료로서는 내부유체의 거동을 용이하게 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴을 사용하였으며, 축소모델의 크기는 응답이 잘 측정될 수 있도록 가능한 크게 하였다. 국내에서 생산되는 아크릴판의 최대크기가 1.2m×2.2m인 것을 감안하고 수조의 3차원 영향을 파악할 수 있도록 모델의 내부크기를 2.2m(장변의 길이)×1.15m(단변의 길이)×0.9m(높이)로 하였다. 이러한 크기의 축소모델은 원형(Prototype) 저장조의 크기와 비교하여 길이에 대한 축척이 대략 1/16에 해당된다. 원형수조와 모형수조의 제원 및 동적 특성을 비교하면 표 1과 같다.

표 1 원형과 모형수조의 제원 및 동적 특성

구분		단위	원형수조	모형수조
재료특성	종류		철근콘크리트	투명아크릴
	탄성계수	KN/m ²	2.08×10 ⁷	2.9×10 ⁶
	단위중량	kg/m ³	2,400	1,200
수조제원	크기(내부)	m	35.2×18.4×13.6	2.2×1.15×0.9
	벽체두께	cm	120	3.5
	수위	m	11.2	0.7
수조중량	구조물	ton	7,390	1.4
	유체	ton	7,254	1.8
	합계	ton	14,644	3.2
고유진동수	유체	Hz	0.2	0.8
	구조물	Hz	4.0	20.0
	연계시스템	Hz	3.0	14.0

2.2 면진장치

실험용 면진장치의 제원(그림 1) 및 결정 과정은 다음과 같다.

가. 수평고유진동수 : 2.0 Hz

원형수조에 대하여 0.5Hz의 수평 고유진동수를 갖는 면진장치를 사용하였다. 따라서 면진장치 모델의 고유진동수는 Time Scale 4를 적용하면 2.0Hz가 된다. 이 값은 고유진동수가 0.8Hz인 유체의 Sloshing 운동과는 비연계된다.

나. 연직고유진동수 : 38 Hz

면진시스템의 연직방향 고유주기는 지진시 면진시스템의 응답의 증폭을 피할 수 있도록 설정하여야 한다. 실험에서는 진동대의 가진(加振)영역이 50Hz이므로 수직방향 고유진동수를 50Hz이상으로 하는 것이 바람직하지만 면진장치 제작시의 제한조건으로 인하여 면진장치의 수직방향 고유진동수는 38Hz로 하였다.

다. 감쇠계수 : 16%

일반적으로 적중고무베어링의 감쇠값으로서 10%가 주로 사용되고 있으나, 본 실험에서 사용한 고감쇠 적중고무베어링은 제작회사인 일본의 Bridgestone에서 제시하는 16%를 적용하였다.

라. 수평강성

면진장치의 수평강성은 상부구조물의 질량과 면진장치의 고유진동수에 의하여 결정된다. 면진장치의 수평강성치는 표 2와 같다.

표 2 면진장치의 수평강성

변위 (cm)	0.5	1.0	1.5	2.0
수평강성 (kgf/cm)	112.0	94.5	80.5	69.6
진동수 (Hz)	1.99	1.83	1.69	1.57

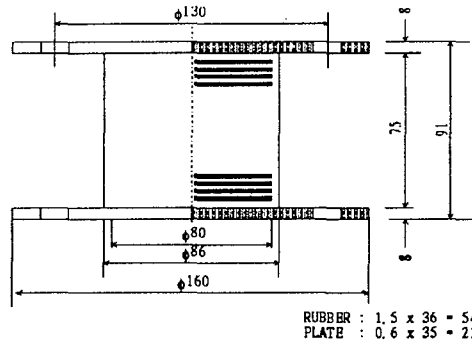


그림 1 면진장치의 제원

마. 연직강성 : $K_y = 40,300 \text{ kgf/cm}$

면진장치의 연직강성은 상부구조물의 질량과 면진장치의 고유진동수에 의하여 결정된다.

바. 최대허용변위 : 150%

2.3 계측시스템

면진수조의 지진시 거동을 분석하기 위하여 수조의 각 부분에 가속도계, 변위계, 및 압력계를 설치하였으며 내부유체의 거동을 측정하기 위하여 파고계를 수면의 상부에 설치하였다. 계측항목 및 설치위치는 각각 표 3, 그림 2와 같다.

표 3 계측장비 및 측정항목

계측장비	측점수	설치위치	측정항목
가속도계	13	A1~A13	구조물의 고유진동수 구조물의 진동모드 구조물의 가속도응답
변위계	3	L1~L3	구조물의 변위응답
압력계	6	P1~P6	유체의 동수압
파고계	2	W1, W2	Sloshing 높이

2.4 실험방법

저장조의 지진시 면진효과를 실증하기 위하여 고정된 수조와 면진장치가 장착된 수조에 대하여 동일한 실험을 실시하였다. 그림 3은 진동대 위에 설치된 면진수조의 시험모델을 보여주고 있다.

입력지진으로서는 1940년도에 발생한 El Centro 지진의 가속도 시간이력을 사용하였다. 진동대의 X축방향으로 EW성분, Y축방향으로 NS성분, Z축방향으로 UD성분을 각각 사용하였다. 실험에서 사용한 지진의 지속시간과 시간간격은 Time Scale인 4를 적용하여 각각 14초와 0.005초로 하였다.

입력지진의 최대지반가속도는 X와 Y 방향성분에서는 0.2g, Z 방향성분은 수평방향 최대지반가속도의 2/3가 되도록 가진하였다. 3방향으로 입력할 경우에는 X, Y, Z 방향 입력운동을 조합하여 사용하였다.

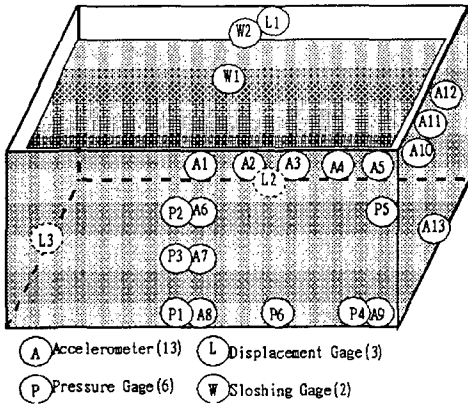


그림 2 계측장비의 설치위치

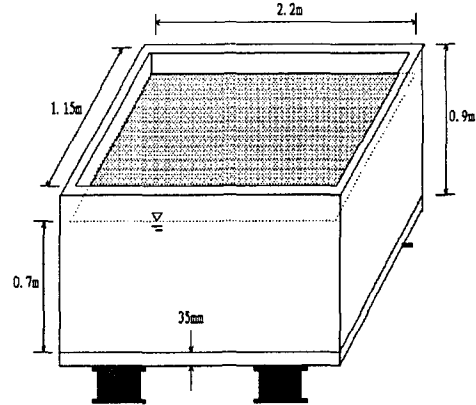


그림 3 면진수조의 시험모델

3. 수치해석

3.1 2차원해석

면진수조의 지진시 거동을 해석하기 위한 2차원 해석은 상부구조인 저장조의 벽체를 집중질량으로 모델링하였으며 면진장치는 탄성스프링과 댐퍼로 모델링하였다. 또한 내부 유체의 동수역학적인 영향을 고려하기 위하여 유체의 부가질량을 산정하여 상부수조 구조물에 부가시키는 방법을 이용하였다. 이때 유체의 부가질량은 유체를 유한요소로 모델링하여 산출하였다.

면진저장조의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[2,3].

$$[M_c] \{ \ddot{U}_c \} + [C_c] \{ \dot{U}_c \} + [K_c] \{ U_c \} = \{ F_c(t) \} \quad (1)$$

여기서, $[M_c]$, $[C_c]$ 및 $[K_c]$ 는 각각 연계계(Coupled System)의 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타낸다. 위의 식으로 부터 면진저장조의 응답은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{ U_c \} = \begin{Bmatrix} y \\ x_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, y 는 수조구조물의 Base에 대한 상대변위를 나타내며, x_b 는 지반에 대한 면진장치의 상대변위를 나타낸다.

3.2 3차원 해석

3차원 해석에서 상부 수조구조물은 판요소를 사용한 유한요소법으로 모델링하고 탄성이론을 이용하였다. 또한 내부유체의 유동은 포텐셜 이론으로 전개하여 경계요소법으로 정식화하였다.

수조를 모델링하기 위하여 유체와 구조물의 경계에서 경계조건인 평형조건과 적합조건을 만족하도록 유체-구조물 연계계의 운동방정식을 도출하고 경계요소와 유한요소를 연계시키면 유체가 들

어있는 수조구조물의 운동방정식을 얻을 수 있다. 모델링된 상부 수조구조물의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[3,4].

$$[M_s] \{\ddot{u}\} + [K_s] \{u\} = - [M_s] \{u_g'' + \dot{s}\} \quad (3)$$

여기서, $[M_s]$, $[K_s]$ 는 유체를 포함하는 수조의 질량 및 강성행렬이며, u 는 수조바닥에 대한 수조 벽체의 상대변위이다. 또한 u_g'' 는 지반가속도, s 는 수조바닥의 지반에 대한 상대변위이다.

상부 수조구조물에 연계된 면진장치의 지배방정식은 다음과 같다.

$$M_t \ddot{s} + C_0 \dot{s} + f(s) + \sum_{j=1}^N \beta_j z_j'' = -\ddot{u}_g \quad (4)$$

여기서, $\beta_j = \sum_{i=1}^N M_i \phi_{ij}$, $M_t = m_b + \sum_{i=1}^N M_i$ 이며, m_b 와 M_i 는 각각 수조 Base의 질량과 상부구조물의 i 번째 Modal Mass이다. 또 N 은 상부구조물의 총자유도수, C_0 와 $f(s)$ 는 각각 면진장치의 감쇠값 및 수평복원력, z 는 상부구조물의 Modal Amplitude, ϕ_{ij} 는 모드형상벡터를 나타낸다.

위의 두식으로 부터 유체-구조물이 연계된 상부구조물의 모드해석을 한후 면진장치의 지배방정식과 연계하여 수조구조물과 면진장치의 거동을 해석한다.

4. 실험 및 수치해석 결과

그림 4는 면진 및 비면진 수조의 벽체 상단에서의 가속도 응답을 비교한 것으로서 입력지진의 최대지반가속도 0.2g에 대하여 면진수조의 경우 최대응답이 약 0.4g로서 입력지진에 비해 약 2배 증폭된 결과를 보여주고 있으며, 비면진 수조의 경우에는 최대 2.6g 정도로서 입력지진의 13배 이상으로 증폭되는 결과를 나타내었다. 따라서 면진장치가 구조물의 가속도 응답을 줄이는데 효과적인 것을 알 수 있다.

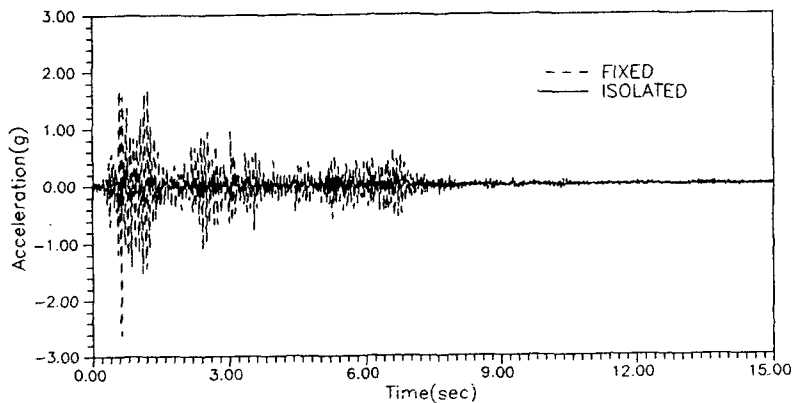
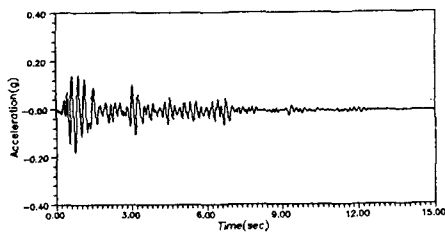


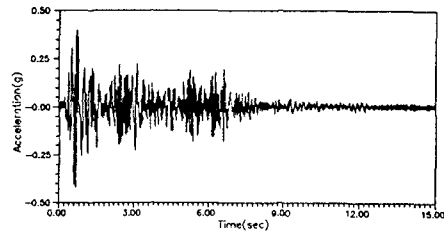
그림 4 면진 및 비면진 수조의 벽체 상단에서의 가속도응답 비교

그림 5와 6은 최대지반가속도가 0.2g인 입력지진에 대한 수조 Base 및 상부에서의 가속도 응답을 2차원 및 3차원 해석결과와 비교한 것이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 수조 Base에서의 응답은 전체적으로 동일한 경향을 나타내고 있으며 2차원 해석기법에 의한 결과는 실험결과 보다 약간

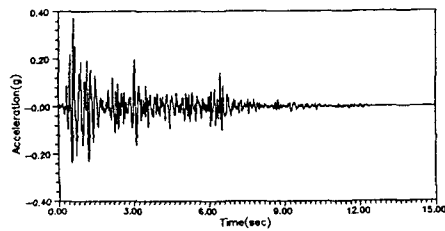
큰 응답을 보여주고 있다. 그림 6의 수조 벽체 상부에서의 응답은 실험결과와 해석결과가 약간 상이한 양상을 보여주고 있다. 전반적인 시간이력곡선의 경향은 유사하나 최대응답가속도의 값에서 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이들은 계측상의 오차 및 잡음에 의한 영향뿐만 아니라 수치해석 모델링에 의한 오차에 의한 것으로 판단된다. 그림 7은 수조 상부에서의 가속도응답을 진동수영역에서 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 4.5Hz 부근에서 나타나는 면진장치의 고유진동수에 근접한 응답은 실험결과와 해석결과가 모두 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 구조물의 고유진동수에 해당하는 2차 최대치가 발생하는 진동수에서 각기 다른 결과를 보이고 있다. 2차원 해석에서는 수조의 벽체를 캔틸레버로 모델링하기 때문에 수조구조물의 벽체의 강성이 작게 모델링된다. 따라서 수조벽체의 최대응답이 실험치와 3차원해석치의 10.5Hz 보다 작은 9Hz 부근에서 발생한다.



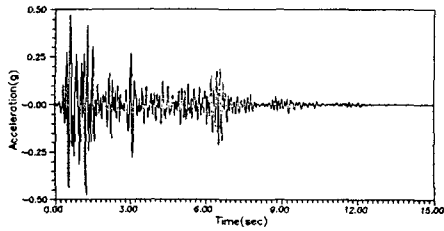
(a) 실험결과



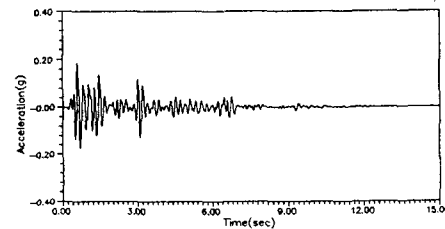
(a) 실험결과



(b) 2차원해석

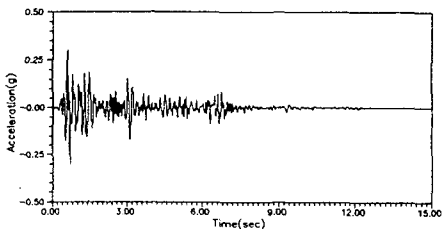


(b) 2차원해석



(c) 3차원해석

그림 5. Base에서의 응답비교

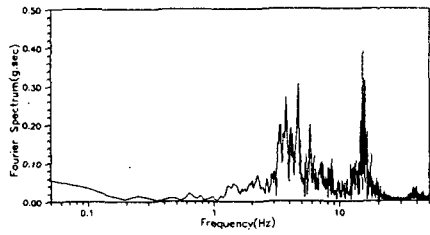


(c) 3차원해석

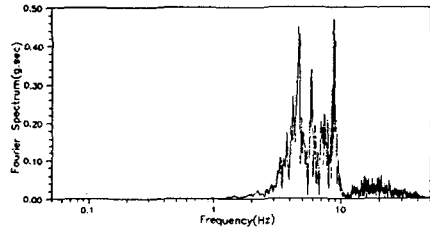
그림 6 벽체 상부에서의 응답비교

면진 및 비면진 수조에서의 수면의 유동은 그림 8에서 보는 바와 같이 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 해석결과가 실험결과에 비해 고차모드가 많이 나타나고 있는 것은 유체의 요소수를 증가 시킴으로써 그 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 그림 9에서는 면진수조의 수면 유동을 비교하였다. 비면진 수조에서와 마찬가지로 해석에 의한 결과가 실험에 의한 결과에 비해 고차모드의 영향이 많이 나타나 있으며 최대 수면높이가 동일한 값을 보여주고 있다. 면진장치를 사용함으로써 면진수조의 고유진동수가 낮아져 유체의 유동이 크게 증가할 것으로 예상되었으나 본 실험에서와

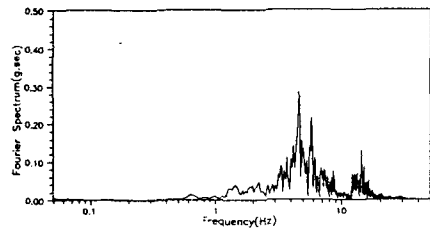
같이 입력지진의 주파수성분이 고주파수가 지배적이며 면진수조의 진동수가 유체의 진동수와 차이가 있을 경우에는 유체의 유동이 증폭되지 않고 비면진에서의 결과와 동일한 크기를 보여주고 있다.



(a) 실험결과

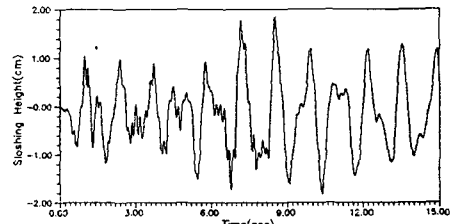


(b) 2차원해석

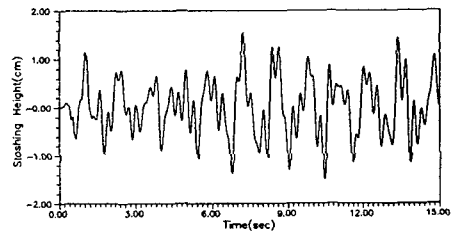


(c) 3차원해석

그림 7. 벽체상부에서의 가속도 Fourier Spectrum

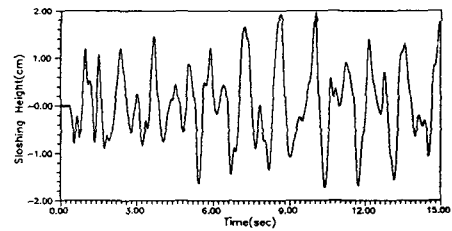


(a) 실험결과

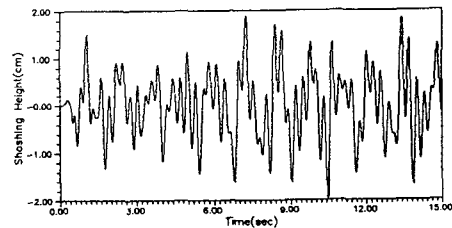


(b) 3차원해석

그림 8 비면진수조에서의 유체의 유동



(a) 실험결과



(b) 3차원해석

그림 9 면진수조에서의 유체의 유동

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 면진 및 비면진 저장조의 축소모델에 대한 진동대실험을 통하여 면진장치의 효과와 수치해석기법의 타당성을 검증하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 면진시스템은 지반진동이 구조물에 전달되는 것을 현저하게 감소시켜 구조물에 미치는 영향을 크게 감소시킨다.
- 유체의 유동은 면진장치의 동적 특성을 적절히 조절함으로써 증폭되는 현상을 방지할 수 있다.
- 수조 벽체의 유연성이 큰 경우에는 2차원해석기법을 사용해도 어느정도 정확한 거동을 나타낼 수 있다.
- 대체적으로 3차원해석 결과는 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있으나 보다 정확한 검증과 거동분석을 위해서는 실험방법과 수치해석기법에 대한 더욱 상세한 검토와 함께 많은 실험자료의 확보가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 방사성폐기물 관리기금으로 수행한 연구결과의 일부로서 실험을 수행한 서울대학교 토목공학과 관계자와 면진장치를 제공한 일본의 Bridgestone사에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- [1] M. Bouchon, "Nuclear Spent Fuel Storage Pools on Aseismic Bearing Pads," Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol.V, pp.633~638, 1988.
- [2] J.K. Kim, I.K. Choi, J.M. Seo, Y.S. Choun, J. Kim, and D.H. Ha, "Performance of Base-Isolated Spent Fuel Storage Pool Structures," Transactions of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol.K2, pp.345~350, Stuttgart, 1993.
- [3] 과학기술처, 사용후핵연료 저장취급기술개발 : 제2권 사용후핵연료 저장조의 면진구조해석, KAERI-NEMAC/RR-114/94, 1994.
- [4] 기초전력공학공동연구소, 면진 및 비면진 저장조의 축소모델 시험, 한국원자력연구소 용역보고서, 1994.