

## 내진벽 강성이 면진시스템의 지진응답에 미치는 영향

구경희\*, 이재한, 이형연, 김종범, 유봉

한국원자력연구소

### 요 약

본 연구의 목적은 국내에서 개발중인 액체금속로의 면진설계를 위하여 면진층과 원자로용기 사이에 있는 내진벽의 강성이 면진시스템의 지진응답에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 이를 위하여 내진벽강성을 고려한 모우드해석을 수행하여 내진벽의 강성변화에 따른 동특성해석을 수행하였으며 면진 및 비면진시스템의 경우에 대하여 지진해석을 수행하였다. 면진 및 비면진시스템에 대한 지진해석결과에서 비면진시스템의 경우에 내진벽강성은 지진응답에 영향을 주지만 면진시스템의 경우에는 그 영향이 매우 작은 것으로 나타났다.

### 1. 서 론

해외 원자력선진국에서는 차세대 주요 전력생산원으로서 액체금속로(Liquid Metal Reactor) 개발에 박차를 가하고 있다. 일본은 이미 280 MWe 급의 몬주 원형로를 설계, 건설하여 최근에 전력생산에 성공하였다. 현재 해외에서 개발 중에 있는 대표적인 액체금속로는 미국의 PRISM[1]과 일본의 MDP[2]가 있다.

일본의 몬주 액체금속로는 면진설계가 적용되지 않고 기존 경수로의 내진설계법에 따라서 설계, 건설되었다. 그러나 미국과 일본은 개발중인 PRISM 과 MDP 에 대하여 면진개념을 적용함으로써 지진하중에 대한 원천적인 설계하중 감소와 안정성 및 경제성 제고를 실현하기 위한 연구를 계속하고 있다[1,3]. 미국에서 개발하고 있는 PRISM 원자로의 면진방식은 원자로용기 상단의 지지위치에 면진층을 설치하여 면진층의 높이가 원자로 상단에 위치하도록 하였다. 그러나 일본이 개발하고 있는 MDP 원자로는 면진층을 원자로건물 최하단부에 설치하여 원자로보다 낮게 위치하도록 하였다. 따라서 PRISM 원자로의 면진방식은 면진층의 거동이 직접 원자로 지지점에 전달되지만 MDP 원자로의 경우는 면진층의 거동이 내진벽을 거쳐 원자로 지지점으로 전달된다[1,2]. 이러한 PRISM 과 MDP 의 면진방식의 차이는 각각 장단점이 있다고 판단되며 PRISM 의 경우 내진벽의 영향은 무시할 수 있으나 원자로건물 전체에 대한 면진장치 배치가 어려울 가능성이 있다. 그리고 MDP 의 경우는 면진장치의 배치가 용이하나 내진벽의 영향을 고려하여 면진설계를 해야 하는 어려움

이 있다.

본 연구에서는 현재 국내에서 개발중인 KALIMER 액체금속로의 면진설계를 위하여 면진층을 일본의 MDP와 같이 원자로건물 바닥면에 위치시킬 경우 발생할 수 있는 내진벽의 영향을 살펴보고자 한다. 적용예로서 설정된 상부구조물은 PRISM 원자로와 유사한 크기를 갖는 원자로이며 면진장치는 적층고무를 사용한 면진베어링인 경우에 대하여 적용하였다. 면진베어링의 수학적모델에는 그 성능특성에 따라서 여러가지 해석모델을 사용할 수 있으나[4,5] 본 연구에서는 단순 히스테리틱 Bilinear 모델을 사용하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 면진시스템 모델링

본 연구에 사용된 상부구조물은 액체금속로용 원자로용기로서 그림 1과 같으며 지진해석을 위하여 3개의 요소를 갖는 집중질량모델을 사용하였다. 이러한 지진해석모델은 1차 고유진동수가 14.51 Hz, 2차 고유진동수는 52.48 Hz로서 이는 ANSYS 범용 유한요소해석코드를 사용한 3차원 상세모델에 대한 해석결과와 잘 일치한다 [6]. 내진벽에 대한 수학적 모델은 그림 2와 같이 관성력을 무시한 면진층과 원자로용기 상단부를 연결하는 강성으로 모델링하였으며 면진층과 원자로용기 지지층의 질량은 각각  $1 \times 10^4 \text{ lb}_m$ 로 가정하였다. 그리고 원자로용기는 모든 모드에 대하여 5%의 점성감쇠를 갖는 것으로 가정하였다.

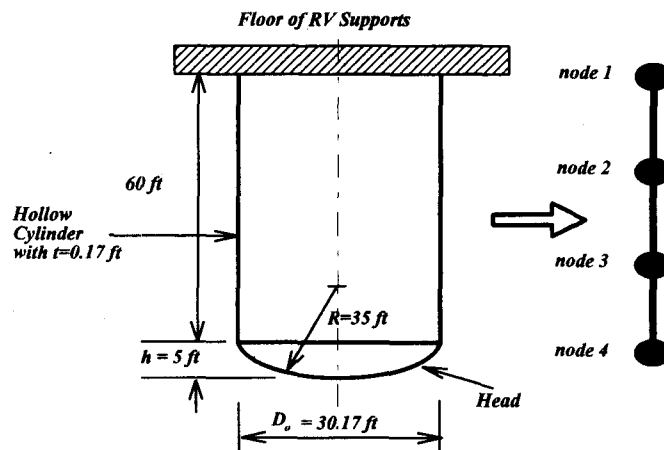


그림 1. 액체금속로용 원자로용기 지진해석모델

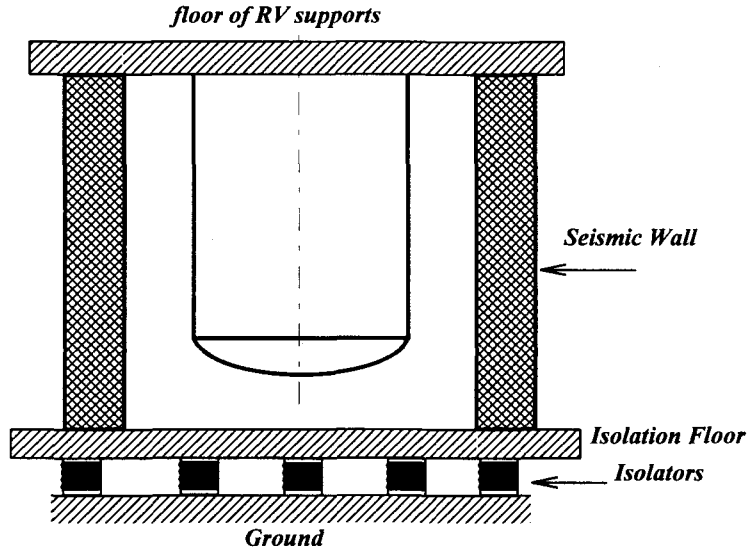


그림 2. 내진벽을 고려한 면진시스템 모델

## 2.2 내진벽 강성을 고려한 모드해석

먼저 내진벽의 강성변화에 따른 상부구조물의 동특성변화를 살펴보기 위하여 모드해석을 수행하였다. 모드해석에는 내진벽에 대하여 원자로용기를 단자유도계로 가정한 경우와 다자유도계로 가정한 경우에 대하여 각각 수행하였으며 내진벽의 강성변화에 따른 모드해석 결과는 표 1 과 같다. 표 1 에서 단자유도계 경우의 고유진동수는 면진층의 질량과 원자로용기의 질량을 합친 전체질량  $2.509 \times 10^4 \text{ lb}_m$ 에 대하여  $f = \sqrt{(K/M)} / (2\pi)$  식에 따라서 계산된 것이다. 표에서와 같이 단자유도계의 모델은 내진벽의 강성이 약한 경우, 즉 저주파영역에서는 다자유도계와 잘 일치하나 내진벽의 강성이 증가할수록 해석오차가 크게 나타난다. 이는 내진벽의 강성이 증가할수록 내진벽 강성과 원자로용기의 강성이 연계되어 나타나기 때문이며 내진벽의 강성이  $1 \times 10^9 \text{ lbf/ft}$  이상이면 내진벽은 강체로 가정할 수 있다. 내진벽이 상부구조물에 대하여 0.1 Hz의 고유진동수를 갖는 저강성 특성치를 갖게 되면 원자로용기의 1차고유진동수는 20.54 Hz로 내진벽이 없이 원자로용기 지지점의 자유도가 구속된 경우의 고유진동수인 14.51 Hz 보다 약간 높게 나타난다. 이때 원자로용기와 내진벽과의 연계가 약하게 나타나며 원자로용기 자체의 모드 형상이 지배적으로 나타난다. 그리고 원자로용기와 내진벽은 내진벽 강성이 증가할수록 모드 형상의 연계가 점점 크게 나타나면서 내진벽의 강성이  $1 \times 10^9 \text{ lbf/ft}$  이상이면 내진벽은 강체로 거동하고 상부구조물 전체는 원자로용기 자체의 모드 형상만 나타나는 14.51 Hz에 접근한다. 그림 3은 내진벽강성 변화에 따른 고유진동수의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다.

표 1. 내진벽 강성변화에 따른 모우드해석결과

모델	내진벽강성 $K=(2\pi f)^2 M, \text{lb}/\text{ft}$						
	$9.905 \times 10^3$	$9.905 \times 10^5$	$2.476 \times 10^7$	$9.905 \times 10^7$	$8.914 \times 10^8$	$2.476 \times 10^9$	$9.905 \times 10^9$
단자유도계(Hz)	0.1	1.0	5.0	10.0	30.0	50.0	100.0
다자유도계(Hz)							
(1 차모우드)	0.10	1.00	4.85	8.84	13.84	14.43	14.51
(2 차모우드)	20.54	20.56	21.11	23.03	40.03	50.26	52.48

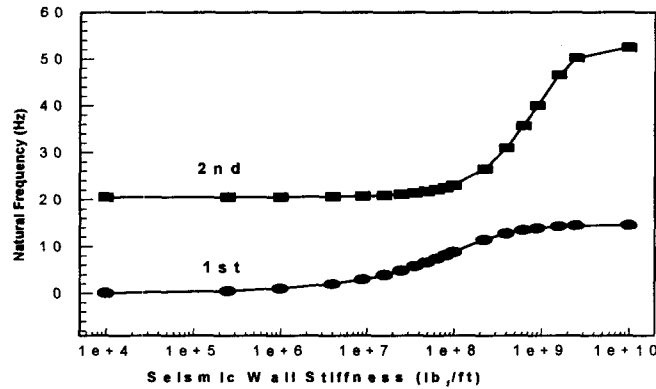


그림 3. 내진벽강성 변화에 따른 고유진동수 변화

### 2.3 면진시스템 지진해석

면진시스템에 대한 지진해석에는 비교적 해의 정확성을 보장할 수 있는 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에 사용된 입력지진하중은 1940 EL-Centro(NS)이며 이 지진은 그림 4와 같은 지반응답스펙트럼 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 면진베어링의 수학적모델로서 단순 히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용하였으며 면진주파수를 0.7 Hz로 설정하였다. 면진베어링 모델에 사용된 자료는 다음과 같다.

$$K_1 = 6.79 \times 10^5 \text{ lb}_f / \text{ft}, K_2 = 2.72 \times 10^6 \text{ lb}_f / \text{ft}, Y = 1.0 \times 10^4 \text{ lb}_f \text{ sec} / \text{ft}$$

그림 5는 내진벽강성 변화에 따른 원자로용기 헤드에서의 최대 침두가속도 응답결과를 나타낸 것이다. 그림에서 비면진시스템의 경우에 내진벽의 강성특성 변화에 의해서 상부구조물의 고유진동수가 달라지면 최대 침두가속도응답이 그림 4의 입력지진하중의 주파수성분에 따른 가속도 크기에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

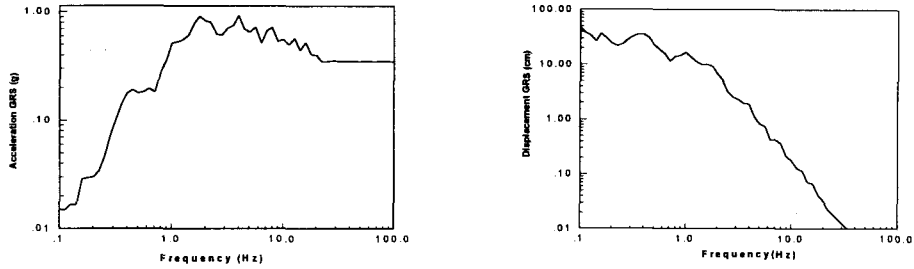


그림 4. 1940 El-Centro(NS) 지진의 응답스펙트럼 특성

그러나 0.7 Hz의 면진주파수를 채택한 면진시스템의 경우에는 최대 침두가속도 응답이 내진벽의 강성영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림 6은 비면진시스템의 경우에 내진벽 강성변화에 따른 원자로용기헤드의 입력지진하중에 대한 최대 상대변위 응답 결과를 나타낸 것으로 가속도응답과 마찬가지로 그림 4의 입력지진하중의 주파수성분에 따른 변위 크기의 영향을 받음을 알 수 있다. 그리고 내진벽 강성이 증가할수록 면진층의 최대 변위응답이 작아진다. 면진시스템의 경우에 면진층의 최대 변위응답은 그림 7과 같으며 내진벽의 강성에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 내진벽의 강성이  $1 \times 10^9$  lb/ft 이상이면 PRISM 원자로의 면진방식과 같은 효과를 나타낸다.

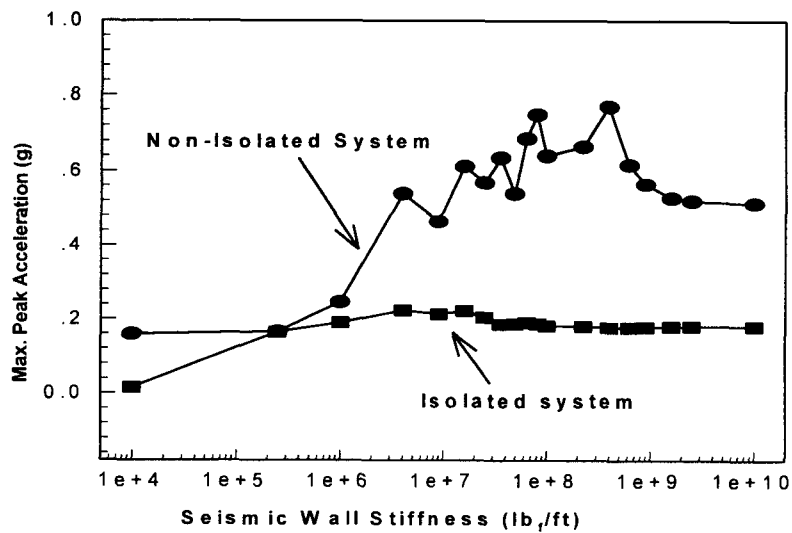


그림 5. 내진벽강성에 따른 원자로헤드 최대가속도응답

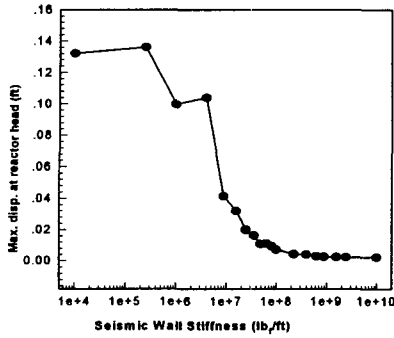


그림 6. 비면진시스템에 대한 원자로용기 헤드 최대 변위응답

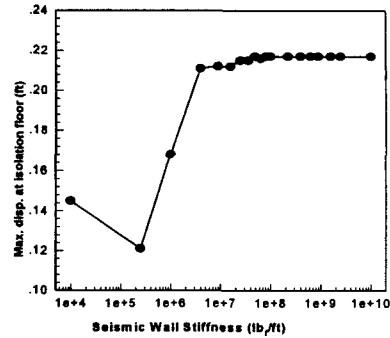


그림 7. 면진시스템에 대한 면진층의 최대 변위응답

### 3. 결론

본 연구에서는 면진층의 위치결정과 관련하여 일본이 현재 개발하고 있는 MDP 액체금속로에서 채택하고 있는 면진방식을 채택할 경우에 내진벽의 영향이 원자로 용기의 지진응답에 미치는 영향을 분석하였다. 비면진시스템의 경우에는 내진벽의 강성이 원자로용기의 지진응답에 영향을 미칠 가능성이 있으나 면진시스템의 경우에는 내진벽의 강성이 지진응답에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 면진층을 원자로건물 하부바닥면에 설치하는 것은 원자로 상부 지지위치에 설치하는 것에 비교하면 지진응답이 크게 차이가 없으며 면진장치 배치설계시 유리한 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. F.F. Tajirian and M.R. Schrag, 1987. Conceptual design of seismic isolation for the PRISM liquid metal reactor. SMiRT 9, K12/10, pp. 705-710.
2. Sadao Hattori, 1989. 고속증식로 기술확증시험의 역할과 고속로 면진기술의 현황. 일본원자력공업, 제 35 권 제 6 호, pp. 11-35.
3. T. Fujita, 1988. 원자력시설에 있어서의 면진구조. 일본원자력공업, 제 34 권 제 12 호, pp. 29-45.
4. T.Fujita, S.Suzuki and et al, 1989. Hysteretic responding force characteristics of high damping rubber bearings for seismic isolation. Seismic Shock, and Vibration Isolation-1989. pp.23-28.
5. 구경희, 이재한 등, 1995. 수정히스테리틱 Bi-linear 면진베어링 모델을 사용한 지진응답감소. 대한기계학회 논문집, 투고중.
6. 구경희, 이재한 등, 1995. 지진해석을 위한 원통형탱크에 대한 집중질량모델 개발. 한국원자력학회 논문집, 투고중.