

면진된 집중질량 보 모델의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of a Isolated Lumped-Mass Beam Model

이재한* 구경희**
Lee, Jae-Han Koo, Gyeong-Hoi

ABSTRACT

For obtaining the time history nodal responses of reactor building, a lumped-mass beam model composed of two sticks for the reactor building and the reactor support structure is developed. The time history responses for the non-isolated and isolated reactor buildings are calculated under an artificial time history, generated using the seismic spectrum curve of US NRC RG1.60. The analysis results show that the horizontal accelerations of the isolated building are dramatically decreased to one-tenths of the non-isolated one, but the vertical responses are increased by about 40%.

1. 서 론

전단벽과 콘크리트 슬라브로 이루어진 액체금속원자로(KALIMER)건물의 전체적인 구조는 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 가로/세로 52m x 39m의 평면구조로 최고 높이는 55m이다. KALIMER의 구조는 크게 6개의 블록으로 구성된다. 우선 원자로가 위치하는 중심 블록과 이를 중심으로 양쪽에 존재하는 증기발생기 및 소듐저장탱크 블록과 원자로구조 뒤쪽으로 보조계통 시설이 존재하는 3개의 블록이 있다. 그리고 원자로 상부에는 핵연료를 취급할 수 있는 공간이 존재 한다[1].

본 논문에서는 원자로건물이 면진 및 비면진된 경우에 대하여 지진시간이력해석을 수행하기 위한 집중질량-보구조 지진해석 모델을 개발하였다. 집중질량 보구조 모델은 건물 전체를 원자로구조물 지지벽과 원자로건물로 구분하는 2축 모델(2-stick model)이며, 이를 이용하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 건물의 면진주파수는 0.5 Hz로 하고, 면진베어링의 동가감쇠계수는 12%로 하였다. 입력지진은 US NRC에서 규정한 지진 스펙트럼으로 만든 인공 지진시간이력자료로 하였다. 수평 및 수직방향 가진에 의한 해석결과로부터 비면진된 경우와 면진된 경우에 대한 응답가속도와 건물의 상대변위와 면진베어링의 변형량을 평가했다.

* 정회원, 한국원자력연구소, 책임연구원

** 한국원자력연구소, 선임연구원

2. 집중질량 보요소 모델링 및 동특성해석

2.1 집중질량 보요소 모델링

KALIMER 원자로건물의 콘크리트벽 두께에 의한 무게는 4 만 8 천톤으로 원자로용기 내의 무게가 2400 톤인 것과 증기발생기, 소듐 저장용기, 핵연료 취급설비 등을 고려하면 5 만톤을 약간 초과하고 있다. 콘크리트의 재료물성치로, 밀도는 2400kg/m^3 이고, 응력계산에 사용될 탄성계수는 24.3 GPa 이다[2].

지진시각이력해석을 위한 단순 지진해석모델 구성은 원자로건물은 건물 전체를 원자로지지벽과 원자로건물로 구분하는 2축 모델(2-stick model)로 그림 1(b)와 같이 작성하였다. 원자로건물에 대하여는 수직방향으로 9 개 구역으로 나누어 10 개의 집중질량 절점과 9 개의 보요소로 모델링하고, 원자로구조물 지지벽은 원자로건물과 같은 높이까지 5 개의 절점과 4 개의 보요소로 모델링하였다. 원자로지지벽과 원자로건물은 절점번호 5 와 15 를 통하여 연결하였다.

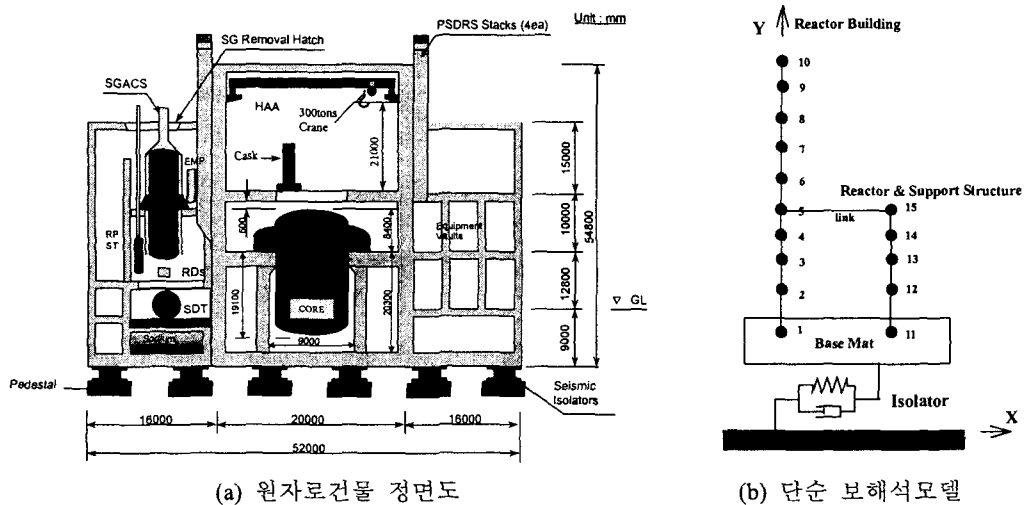


그림 1. 원자로건물 및 집중질량 보모델

보의 관성모멘트는 건물의 전단벽 강성만을 고려하여 계산하였으며, 수평면 상에 존재하는 슬라브는 집중질량으로 처리하였다. 작성된 집중질량-보 모델의 절점 및 요소 특성은 표 1 및 표 2 와 같다. 표 2 에서 보는 바와 같이 질량중심은 각 위치마다 계산되었으며, 강성중심은 절점번호 1 에서 10 까지의 원자로건물과 절점번호 11 에서 15 까지의 원자로구조물 지지벽에 대하여 각각 계산하였다[3].

5 만톤인 원자로건물을 지지하기 위해서는 수직방향 지지하중이 300 톤인 168 개의 면진베어링이 최소한 요구된다. 원자로 건물을 0.5 Hz 로 수평방향 면진하는 경우에 면진베어링의 전체 수평강성은 $4.98 \times 10^8 \text{ N/m}$ 이 요구된다. 이는 면진베어링 하나의 수평강성이 300kgf/cm 정도가 될

것을 요구한다. 등가감쇠계수 12%를 감안하면 전체 면진층의 감쇠값($C=0.12 \times 2(m) \times (2\pi f_n)$)은 $3.80 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$ 가 된다[2]. 그림 2에 나타낸 면진베어링 배치연구[4]를 참조하여 시간이력해석을 수행할 수 있는 단순배치 모델을 그림 3과 같이 작성하였다. 단순 배치모델은 11개의 통합 면진요소로 이루어졌으며, 한 개의 통합 면진요소에 10개, 20개 및 27개의 면진베어링이 통합되었으며, 면진배치의 균형이 맞도록 이들을 적절하게 배치시켰다.

표 1. Nodal Values of Lumped Mass (2-Stick Model)

Node	Height(m)	Concentrated Mass(kg)	Rotary Inertia of Mass(kg.m ²)		
			Ixx	Iyy	Izz
1	0.90	7,583,500	9.2756E+08	1.6732E+09	2.5953E+09
2	4.90	3,368,000	5.9073E+08	1.0178E+09	1.5972E+09
3	9.33	4,332,800	6.8690E+08	1.3222E+09	1.9951E+09
4	15.07	4,001,100	7.5299E+08	1.2057E+09	1.9335E+09
5	21.10	5,038,100	8.5969E+08	1.3067E+09	2.1458E+09
6	26.40	3,538,000	6.3347E+08	1.0529E+09	1.6720E+09
7	33.09	9,116,500	1.5815E+09	2.6354E+09	4.0836E+09
8	43.95	6,487,500	1.2166E+09	2.0172E+09	3.1454E+09
9	50.38	961,200	1.9956E+08	7.5733E+07	2.7309E+08
10	54.10	1,452,500	2.2526E+08	7.2555E+07	2.9633E+08
11	2.08	136,600	1.9355E+06	1.9355E+06	3.8409E+06
12	4.90	534,400	8.4165E+06	8.4166E+06	1.5030E+07
13	9.58	575,900	9.2282E+06	9.2282E+06	1.6198E+07
14	15.07	730,300	1.2572E+07	1.2572E+07	2.0540E+07
15	21.07	2,533,400	7.2071E+06	7.2075E+06	1.2191E+07

표 2. Section Properties of Beam Element (2-Stick Model)

Element	Node	Area(m ²)	Moment of Inertia of Beam Section(m ⁴)		
			Ixx	Iyy	Torsional Rigidity
1	1 2	311.85	.54171E+05	.93715E+05	.9295E+05
2	2 3				
3	3 4	271.08	.50161E+05	.80834E+05	.74767E+05
4	4 5				
5	5 6				
6	6 7				
7	7 8	253.89	.49898E+05	.80311E+05	.78477E+05
8	8 9	104.58	.21377E+05	.80699E+04	.18999E+05
9	9 10				
31	11 12				
32	12 13	49.48	.69581E+03	.69581E+03	.13916E+04
33	13 14				
34	14 15				

$E=2.434E+10(\text{N/m}^2)$, $G=1.0402E+10(\text{N/m}^2)$

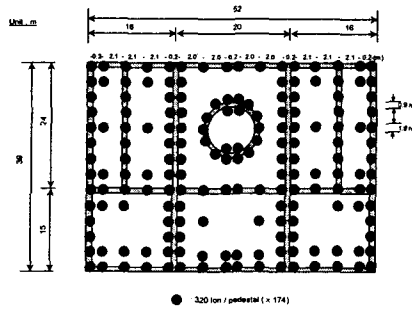


그림 2. 면진베어링 상세 배치도(174 개)

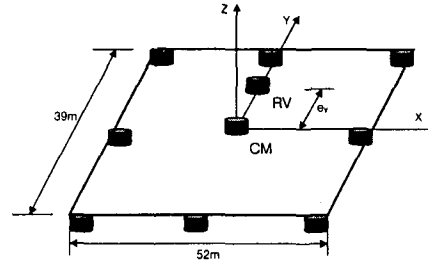


그림 3. 지진해석용 통합 면진요소 배치모델

2.2 집중질량 보 모델의 동특성해석

작성된 단순 집중질량 보 모델의 동특성을 알아보기 위해 구조물이 비면진된 경우 고유진동수 해석을 ABAQUS 프로그램[5]으로 수행한 결과를 표 3에 나타냈다. 구조물의 1차 고유진동수는 Y 방향으로 6.36 Hz로 나타났고, X 방향으로서는 7.07 Hz로 되었다. 수직방향으로는 15.1 Hz에서 첫 번째 고유진동수가 나타났다.

표 3. Natural Frequencies of Non-isolated KALIMER Building (2-Stick Model)

Frequency No.	Major Direction	Frequency (Hz)	Participation Factor	Effective Mass(kg)
1	Y	6.36	1.485	2.65E+07
2	X	7.09	1.416	2.69E+07
3	X	7.82	0.040	4.72E+05
4	Z	15.07	1.357	3.40E+07
5	Y	16.96	-0.652	1.03E+07
6	X	17.22	-0.557	9.65E+06
7		22.78		
8	X	29.78	-0.220	7.33E+05
9	Y	31.35	0.158	9.24E+05
10	X	32.26	0.065	2.05E+05
11	Y	35.11	0.469	1.47E+06
12	X	35.76	0.445	1.20E+06
13	Z	39.66	-0.580	3.66E+06
14		39.78	0.009	

* unit: kg.m², Total weight=5.04 x10⁷kg, Basemat= 7.3 x10⁶kg

원자로건물에 대한 집중질량 보 모델과 11 개의 통합 면진요소로 구성된 면진 원자로건물 해석 모델에 대하여 고유진동수 해석을 수행한 결과는 표 4와 같다.

해석결과는 일반적인 예측과 같이 면진 고유진동수 0.5Hz 에 유효질량이 99% 이상 집중되고, 면진층에 의해서 0.56Hz 에서 회전모드가 발생된 것을 알 수 있어 상부구조물이 수평방향으로 강체에 가까운 거동이 될 것으로 판단된다. 또한 비면진된 원자로건물의 고유진동수 해석결과인 표

3 과 비교하여 원자로건물의 각각 고유진동수 유효질량은 매우 작아졌을 뿐만 아니라 면진에 따라 구조물 자체의 고유진동수가 전체적으로 증가한 것으로 나타났다. 그러나 수직방향의 첫번째 고유진동수는 12.5Hz 에서 발생되어 비면진 경우의 15.1 Hz 에 비하여 약간 낮아진 것을 알 수 있다. 이는 면진요소의 수직방향 강성과의 합성에 따른 영향이다.

표 4. Natural Frequencies of Isolated KALIMER Building (2-Stick Model)

Frequency No.	Major Direction	Frequency (Hz)	Participation Factor	Effective Mass(kg)
1	Y	0.50	1.0075	50388900
2	X	0.50	1.0058	50387200
3	ROT-Z	0.56		
4	Y	7.55	-0.0081	895
5	X	8.60	-0.0057	491
6	Z	12.50	1.3645	43430300
7	ROT-Z	13.67		
8	Y	22.18	0.0008	17
9	X	22.71	0.0006	15
10		26.33		
11	X	28.64	0.0002	1
12	Y	29.89	0.0001	0
13	Z	33.28	-0.5607	4673480
14	X	34.87	-0.0001	0
15	Y	38.43	-0.0004	1

* unit: kg.m² , Total weight=5.04 x10⁷kg, Basemat= 7.3 x10⁶kg

3. 지진응답 시간이력해석

지진응답 해석에 사용한 입력하중은 US NRC RG1.60 에 규정된 지진 스펙트럼 자료로부터 만든 인공지진(Artificial Time History, ATH)으로 0.3g ZPA (Zero Period Acceleration) 시간이력곡선을 그림 4 에 나타냈다. 시간이력지진 응답해석에서 비면진구조물과 면진구조물 모두에 대하여 0.005 초의 시간 간격으로 응답가속도 시간이력해석을 수행하였다.

0.3g 수평방향 가진에 의해 면진 및 비면진 원자로건물의 하부기초판, 원자로용기 지지 위치 및 건물상단에 발생하는 최대 변위 및 응답가속도를 표 5 에 나타냈으며, Y 방향 가진시 변위응답과 원자로지지 위치의 가속도 이력을 그림 5 에서 그림 7 에 나타냈다. 그림 5 의 원자로건물의 지반에 대한 상대변위는 면진요소의 위치에 관계없이 일정하게 발생되었으며, 이는 원자로건물 무게 중심의 편심에 의해 면진건물에 회전운동이 발생하지 않은 것을 보여주고 있다.

0.2g 수직방향 가진에 의해 면진 및 비면진 원자로건물의 원자로지지 위치의 수직방향 가속도 이력을 그림 8 에서 그림 9 에 나타냈다.

표 5. Accelerations and Displacements of Reactor Building under ATH Earthquake

Node No.(location)	X-Direction(g)		Y-Direction(g)		Z-Vertical (g)	
	Fixed - base	Isolated - base	Fixed - base	Isolated - base	Fixed - base	2D base isolation
01 (base)	0.30	0.147	0.30	0.162	0.205	0.304
10 (top)	1.644	0.156	1.852	0.171	0.577	0.821
14 (RV support)	0.817	0.153	0.677	0.147	0.353	0.547
Input acceleration (11 or 301)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.20	0.20
Max. Relative Displacement(mm)		13.22		13.22		0.431 (corner) 0.370 (center)

표 5 에서 보는 바와 같이 면진에 의한 건물에 발생하는 최대 가속도가 면진요소가 12% 증가 감쇠를 갖는 경우 Y 방향으로 1.852g 에서 입력 지진가속도 0.3g 보다 작은 0.171g 로 크게 줄어들고 있으며, 이 때 면진요소의 최대 변형량은 약 13cm 로 커지는 것으로 나타났다.

0.208g 의 수직방향 지진 입력 시 수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 가속도는 0.821g 로 비면진구조물 일 때 0.577g 보다 40%정도 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 알려진 수평면진에 의해서 수직방향 응답가속도가 증가한다는 사실과 일치하고 있다.

면진구조물에 작용하는 0.3g ATH 수평방향 가진으로 발생하는 전복모멘트에 의한 면진베어링의 수직 변형량을 알아보기 위해 각 통합 면진요소의 수직변형량을 조사한 결과 외곽에서 0.431mm 로 중심부 면진요소에서 발생된 0.37mm 와 비교하여 편차가 크지않은 것으로 나타나 전복모멘트가 존재하지만 영향이 크지않은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

KALIMER 원자로건물에 대하여 집중질량 보구조 모델을 만들고, 고유진동수 해석과 지진응답 해석을 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

최대 가속도가 0.30g 인 인공지진하중이 원자로건물에 가해진 경우에 발생된 최대 가속도는 면진하는 경우에는 0.171g 로, 비면진 시에는 1.852g 로 나타나 면진설계 적용시 최대 응답가속도가 크게 줄어들고 있다. 그러나 면진건물의 상대 변위는 13cm 로 크게 증가되었다.

수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 가속도는 인공지진하중에 대하여 0.821g 로 비면진일 때의 0.577g 보다 증가되었다. 이처럼 KALIMER 에 수평면진을 적용한 경우 수평방향의 가속도 값이 크게 감소하였으며, 수직방향으로는 약간 증가하지만 상대변위에 대한 적절한 설계가 이루어지면 전체적으로는 면진설계의 적용이 매우 효율적임을 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

- [1] 한도희 등, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-1636/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [2] 유봉, 이재한, 구경희, 지반특성에 따른 면진 및 비면진구조물의 가속도응답 영향평가, KAERI/TR 607/96, 한국원자력연구소, 1996.
- [3] Korea Nuclear Eng. Services, Inc, 집중질량모델 제원계산용 컴퓨터프로그램(MEMPROP), 1982.
- [4] 이재한, 유봉, 구경희, "KALIMER 원자로건물의 면진베어링 및 상부기초매트의 지진응답해석,' 원자력학회 2000년 추계학술발표회, 2000.
- [5] ABAQUS Computer Program, Version 5.8.

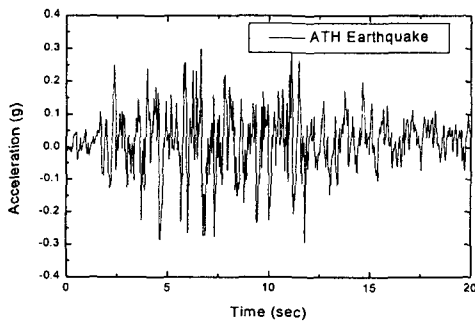


그림 4. Artificial Time History Earthquake

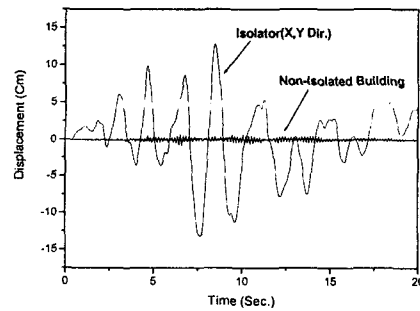


그림 5. Displacement Histories of Reactor Building

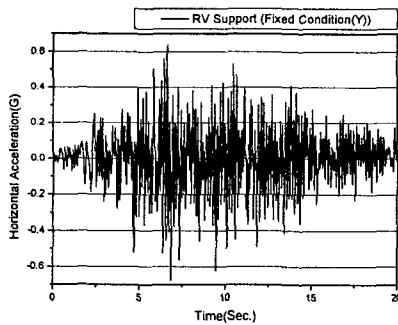


그림 6. Accel. Time History of Non-isolated Building (Y-dir.)

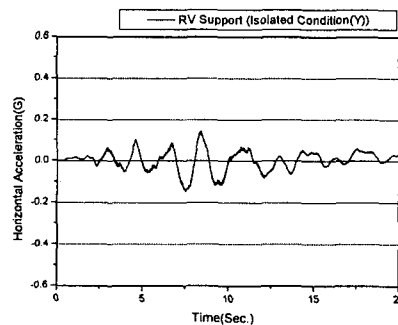


그림 7. Accel. Time History of Isolated Building (Y-dir)

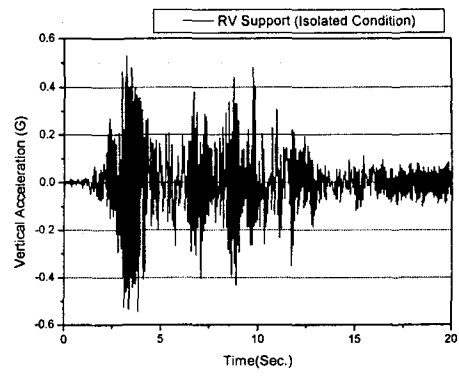
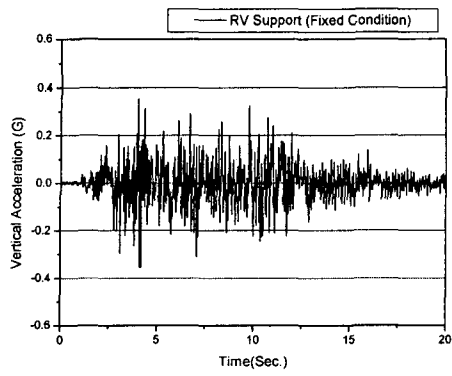


그림 8. Accel. Time History of Non-isolated Building (Z-dir.) 그림 9. Accel. Time History of Isolated Building (Z-dir)