

## KALIMER 원자로건물 지진해석 모델링 및 지진응답해석

유 봉, 이재한, 구경희, 이형연, 최인길  
대전광역시 유성구 덕진동 150  
한국원자력연구소

### 요 약 문

KALIMER 원자로 건물에 대하여 3차원 셸요소 모델과 단순 빔모델을 작성하고 고유진동수 해석을 수행하였다. 두 모델의 1차 수평방향 고유진동수는 대체로 일치하였다. 단순 빔 모델에 대해 원자로건물의 회전 관성모멘트를 해석에 반영한 경우 3차원 모델에는 없는 회전모드가 발생되었다. 지진응답해석은 1940 EL Centro 와 인공지진에 대하여 수행하였으며, 두 결과는 면진구조물의 경우 비면진구조물과 비교하여 응답가속도가 크게 줄고, 상대변위가 증가하는 경향을 보였다.

### I. 서 론

전단벽과 콘크리트 슬라브로 이루어진 KALIMER 원자로건물 설계에는 경제성 측면에서 건물의 총중량과 건물의 내진성에 영향을 주는 건물의 고유진동수는 매우 중요한 요소이다. 전체적인 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 가로 x 세로가 61m x 40m의 하부기초에 건설되고 최고 높이는 51m이다. 칼리머의 구조는 원자로가 위치하는 중심 블록과 이를 중심으로 양쪽에 존재하는 증기발생기 및 소듐저장탱크 블록과 원자로구조 뒤쪽으로 보조계통시설이 존재하는 3개의 블록이 있다. 그리고 원자로 상부에는 핵연료 취급공간이 존재한다[1,2].

본 연구에서는 원자로 건물의 고유진동수 해석을 3차원 셸모델과 단순 빔-질량 모델로 계산하고, 셸모델에 대하여는 지진시간이력해석을 수행하기 위한 단순 빔-질량 해석모델을 개발하였다. 단순 빔-질량 모델은 건물 전체를 원자로구조물 지지벽과 원자로건물로 구분하는 2축 모델(2-stick model)로 이를 이용하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 지진해석모델은 비면진된 경우와 면진된 경우에 대해 질량의 편심과 질량의 회전관성모멘트를 고려한 경우를 택하였다. 면진모델에서 건물의 면진주파수는 0.5Hz로 하고, 면진베어링의 등가감쇠계수는 0%와 12%로 하였다. 입력지진은 1940 EL Centro NS 지진과 US NRC RG 1.60에서 규정한 수평 SSE 0.3g 설계기준 지진스펙트럼에서 만든 인공 지진시간이력으로 하였다. 해석결과로부터 비면진된 경우와 면진된 경우에 대한 응답가속도와 건물에 발생하는 변위와 면진베어링의 변형량을 평가했다.

### 2. 셸요소를 사용한 동특성 해석

동특성 해석에는 ANSYS 5.2 구조해석 프로그램을 사용하였다[3]. 사용한 요소는 쉘요소가 주류를 이루며 그 외에 질량(MASS21)요소와 빔(BEAM4)요소를 사용했다. 모델에서 질점수는 2971 개, 요소는 약 2600 개가 사용되었다. 고진동수 해석에는 Subspace 방법을 이용했다.

해석결과 전단벽의 국부 모우드 고유진동수가 3.28Hz 까지 낮아지고, 많은 국부모우드가 발생되었다. 수평방향의 가로/세로 지배 고유진동수는 각각 7.3 Hz 와 7.0 Hz 로 나타났다. 벽 두께가 얇은 관계로 수직방향 뿐만 아니라 세로방향으로도 특별히 집중되는 고유모드가 없고 전반적으로 분산된 분포를 보여주고 있다.

수평 1 차(X)	수평 1 차(Y)	수직 1 차(Z)	국부모드(수직)	전체무게(tons)
7.3 Hz	7.0 Hz	6.74 Hz*	3.28 Hz	5 만 8 천

\* 수직방향 국부모드 중의 하나로 유효질량비가 크지 않음

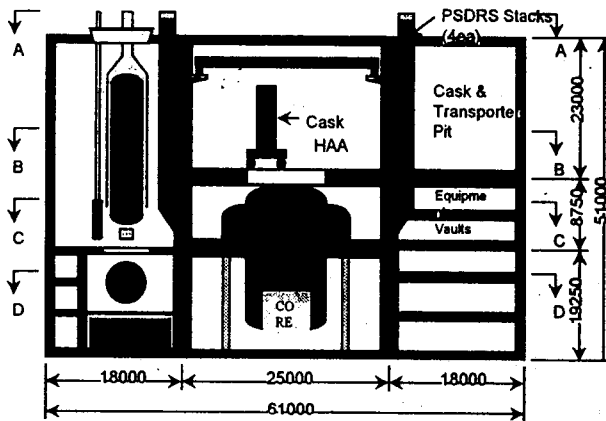


그림 1. 칼리머 원자로건물 구조도

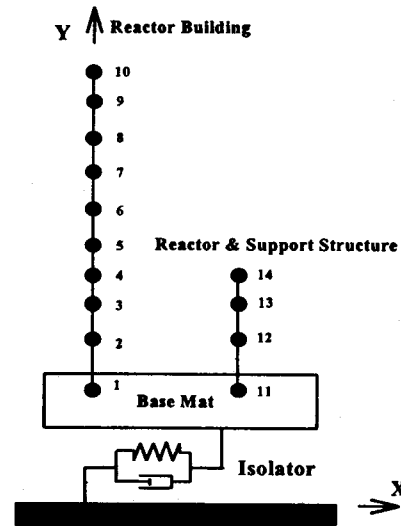


그림 2. Lumped Mass-Beam Models

### 3. 집중질량-빔을 사용한 동특성 해석

전단벽과 콘크리트 슬라브로 이루어진 KALIMER 원자로 건물의 단순한 지진해석 모델을 개발하기 위하여 그림 2와 같은 모델을 작성하였다[4]. 구분된 원자로건물에 대하여는 수직 방향으로 9 개 구역으로 나누어 10 개의 집중질량 절점과 9 개의 빔요소로 모델링하고, 원자로 구조물 지지벽은 원자로건물과 같은 높이까지 4 개의 절점과 3 개의 빔요소로 모델링하였다. 표 1은 빔요소의 단면특성을 나타냈으며, 표 2는 질량특성을 나타냈다.

표 1. Section Properties of Beam Element( 2-Stick Model)

Element	Area (m <sup>2</sup> )	Moment of Inertia of Beam Section(m <sup>4</sup> )		
		Ixx	Iyy	Torsional Rigidity
1-10	308	.62E+05	.12E+06	.719E+05
31-33	78	.27E+04	.27E+04	.534E+04

E=2.434E+10(N/m<sup>2</sup>), G= 1.0402E+10(N/m<sup>2</sup>)

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

Node	Height(m)	Concentrated Mass(tons)	Rotary Inertia of Mass(x10 <sup>8</sup> kg.m <sup>2</sup> )		
			Ixx	Iyy	Izz
1	1.00	11,629	16.80	37.30	53.98
2	7.00	6,712	10.90	21.74	32.23
3	13.63	5,555	9.018	17.93	26.68
4	19.17	6,819	8.080	17.02	24.95
5	23.71	3,141	6.341	12.65	18.90
6	28.26	6,179	9.247	19.81	28.88
7	34.00	4,435	9.019	17.93	26.68
8	40.00	4,435	9.019	17.93	26.68
9	45.69	3,993	8.138	16.07	24.01
10	50.33	4,874	7.363	16.49	23.80
11	2.44	345	.1210	.1211	.2401
12	7.00	1,353	.5235	.5235	.9284
13	13.63	1,120	.4178	.4178	.7684
14	19.20	2,397	.1486	.1484	.2723

비면진된 빔모델에 대하여 빔의 관성모멘트는 건물의 전단벽 강성만을 고려하여 계산하였으며, 수평면 상에 존재하는 슬라브는 집중질량으로 처리되었다. 질량의 회전관성모멘트를 고려한 경우의 해석결과를 표 3에 제시하였다.

표 3 Natural Frequencies of KALIMER Building Using Mass and Rotary Inertia

Frequency No.	Major Direction	Frequency (Hz)	Participation Factor	Effective Mass(kg)
1	Z-rot	6.21	-6.07	1.35E+10*
2	Y	6.35	1.26	2.82E+07
3	X	7.33	1.26	2.97E+07
4	Z	15.1	1.30	3.77E+07
5	X	17.0	.422	1.05E+07
6	Y	17.6	.507	1.13E+07
8	X	29.0	-.198	1.48E+06
10	Y	31.7	.167	1.17E+06

\* : (kg.m<sup>2</sup>), Total weight =5.8E7 kg, Basemat=1.16E7kg

표 4 Natural Frequencies of Isolated KALIMER Building Using Mass and Rotary Inertia

Frequency No.	Major Direction	Frequency (Hz)	Participation Factor	Effective Mass(kg)
1	Y	0.5	1.00	5.78E+07
2	X	0.5	1.00	5.78E+07
3	Z-rot	6.21	-2.82	1.99E+10*
4	Y	8.73	-.0049	491
5	X	10.1	-.0023	257
6	Z	12.8	1.34	3.73E+07
8	X	21.7	.0056	17.3
9	Y	23.0	.0058	15.9
11	X	31.3	.0027	2.12

\* unit: (kg.m<sup>2</sup>)

면진된 건물모델의 원자로건물 특성은 앞서와 같다. 원자로건물을 0.5 Hz로 면진하는 경우 면진베어링의 수평강성은 5.77 x 10<sup>8</sup> N/m이 되고, 등가감쇠계수를 12%로 하면 감쇠값은

4.356 x 10<sup>7</sup> N.sec/m 가 된다[6]. 질량중심의 편심과 질량의 회전관성모멘트를 고려한 경우의 해석결과를 표 4 에 제시하였다. 이 결과를 비면진된 원자로건물의 고유진동수 해석결과와 비교한 결과 면진에 따라 구조물의 고유진동수가 전체적으로 증가되고, 면진주파수에 유효 질량이 집중되어 있으며, 면진에 상관없이 질량의 회전관성모멘트의 영향이 고유진동수에 나타났다.

#### 4. 원자로건물 지진해석

지진해석에 사용된 모델은 단순 집중질량 빔 모델로 입력 지진은 1940 EL Centro NS 지진과 US NRC 에 규정한 지진 스펙트럼으로 만든 인공지진 시간이력으로 하였다.

##### 가. EL Centro 지진 시간이력해석

EL Centro NS 지진의 수평방향 가진에 의해 면진 및 비면진 원자로건물의 하부기초판, 원자로용기 지지 위치 및 건물상단에 발생하는 최대 응답가속도를 표 5 에 나타냈으며, x 방향 가진시 건물상단과 원자로용기 지지점의 응답스펙트럼을 그림 3 과 4 에 나타냈다. 표 5 에서 보는 바와같이 면진에 의한 건물에 발생하는 최대 가속도가 면진베어링이 12% 등가감쇠를 갖는 경우 1.557g 에서 입력지진가속도 0.348g 보다 작은 0.14g 로 크게 줄어들고 있으며, 이 때 면진베어링의 최대 변형량은 12.7cm 로 커지는 것으로 나타났다.

표 5. Acceleration and Displacement Values of Reactor Building under EL Centro Earthquake(NS)

Node No.	X-Direction(g)			Y-Direction(g)		
	fixed - base	isolated-base (equivalent damping)		fixed-base	isolated-base (equivalent damping)	
		0%	12%		0%	12%
01 (base)	0.347	0.177	0.136	0.347	0.178	0.136
10 (top)	<b>1.557</b>	0.179	<b>0.142</b>	<b>1.058</b>	0.179	<b>0.137</b>
14 (RV support)	<b>0.754</b>	0.177	<b>0.134</b>	<b>0.506</b>	0.178	<b>0.135</b>
11 or 301(ground)	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348	0.348
Max. Relative Displacement(cm)	0.609	17.66	12.71	0.657	17.66	12.72

##### 나. 인공지진 시간이력해석

US NRC 에 규정된 지진 스펙트럼 자료로부터 만든 인공지진(Artificial Time History,ATH) 자료를 사용한 해석을 수행하였다. 지진의 최대 가속도는 0.30g 이다. 수평방향 가진에 의해 면진 및 비면진 원자로건물의 하부기초판, 원자로용기 지지 위치 및 건물상단에 발생하는 최대 응답가속도를 표 6 에 나타냈으며, x 방향 가진시 건물상단과 원자로용기 지지점의 응답스펙트럼을 그림 5 와 6 에 나타냈다. 면진시 건물에 발생하는 x 방향 최대가속도가 면진 베어링이 12% 등가감쇠를 갖는 경우 1.461g 에서 입력지진가속도 0.30g 보다 작은 0.177g 로 크게 줄었으며, 이 때 면진베어링의 최대 변형량은 약 20cm 로 커지는 것으로 나타났다.

0.208g 의 수직방향 가진시 수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 가속도는 0.848g 로 비면진 일 때의 0.557g 보다 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 알려진 수평면진에 의해서 수직방향 응답가속도가 증가한다는 사실과 일치하고 있다[6].

표 6. Acceleration and Displacement Values of Reactor Building under ATH Earthquake

	X-Direction(g)			Y-Direction(g)			Z-Vertical (g)	
	fixed - base	isolated-base (eq. damping)		fixed-base	Isolated-base (eq. damping)		fixed-base	2D isolator
Node No(location)	-	0%	12%	-	0%	12%	-	-
01 (base)	0.30	0.277	0.175	0.30	0.277	0.177	0.205	0.321
10 (top)	<b>1.461</b>	<b>0.280</b>	<b>0.177</b>	<b>1.609</b>	<b>0.280</b>	<b>0.179</b>	<b>0.577</b>	<b>0.848</b>
14 (RV support)	<b>0.583</b>	<b>0.276</b>	<b>0.173</b>	<b>0.676</b>	<b>0.276</b>	<b>0.175</b>	<b>0.362</b>	<b>0.558</b>
Input acceleration (11 or 301)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.208	0.208
Max. Relative Displacement(cm)	0.638	<b>30.8</b>	<b>19.73</b>	0.832	<b>30.7</b>	<b>19.73</b>	0.069	0.102

한편 3 차원 셸모델의 지진응답스펙트럼 해석결과[2]와 시간이력해석결과를 표 7에 제시하였다. 표 7에서 보는 바와 같이 비면진과 면진 모두에서 수평방향의 응답변위는 대체로 일치하지만 지진응답 스펙트럼 해석 값이 크게 평가 되었다. 수직방향의 응답변위는 3 차원 셸모델의 상단 슬라브 국부모드가 발생하여 직접적인 비교가 되지 않았다.

표 7. Displacements of Isolator and Reactor Building w.r.t. Analysis Type under ATH Earthquake

Analysis Type	X-Direction(cm)		Y-Direction(cm)		Z-Vertical (cm)	
	Fixed-base	isolated-base (eq. damping,0%)	fixed-base	Isolated-base (eq. damping,0%)	fixed-base	2D isolator
Time History (Lumped Mass Model)	0.638	<b>30.8</b>	0.832	<b>30.7</b>	0.069	0.102
Response Spectrum (3D Solid Model)	1.0	<b>37.2</b>	3.0	<b>37.5</b>	3.0*	2.2*

\*: Local Displacements of Upper Slab

### 5. 결론

KALIMER 원자로 건물에 대하여 원자로 건물 전체를 셸요소로 구성된 3 차원 동특성 해석모델과 지진응답해석을 수행할 수 있는 단순 빔 모델을 만들고, 고유진동수 해석과 지진응답해석을 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

단순 빔 모델의 수평방향 1 차 고유진동수는 3 차원 셸 모델의 수평방향 1 차 고유진동수와 잘 일치하나 수직방향의 고유진동수에 대하여는 3 차원 셸 모델의 경우 국부모드 영향 때문에 빔 모델보다도 작게 나타났다.

지진응답해석 결과로부터 면진구조물에서 발생하는 응답가속도가 크게 줄고, 상대변위가 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다. 최대 가속도가 0.30g 인 인공지진으로 원자로 건물을 가진한 경우에 최대 가속도는 면진하는 경우에는 0.177g 로, 비면진 시에는 1.461g 로 나타나 면진설계 적용시 최대 응답가속도가 크게 줄어들고 있다.

수평면진에 의해서 수직방향에 나타난 가속도는 인공지진하중에 대하여 0.848g 로 비면진 일 때의 0.577g 보다 증가되었다. 이처럼 KALIMER 에 수평면진을 적용한 경우 수평방향의 가속도 값이 크게 감소하였으며, 수직방향으로는 약간 증가하지만 전체적으로는 면진설계의 적용이 매우 효율적임을 보였다.

참고문헌

- [1] 박창규 등, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, 한국원자력연구소, 1997.
- [2] 박창규 등, 액체금속로개발- 액체금속로 설계개념연구(제 8 절 KALIMER 면진설계의 적용), KAERI/RR-1719/97, 한국원자력연구소, 1997.
- [3] ANSYS Computer Program, Version 5.2.
- [4] Korea Nuclear Eng. Services, Inc, 집중질량모델 채원계산용 컴퓨터프로그램(MEMPROP), 1982
- [5] ABAQUS Computer Program, Version 5.7.
- [6] 유봉, 이재한, 구경희, 지반특성에 따른 면진 및 비면진구조물의 가속도 응답 영향평가, KAERI/TR-607/96, 한국원자력연구소, 1996.

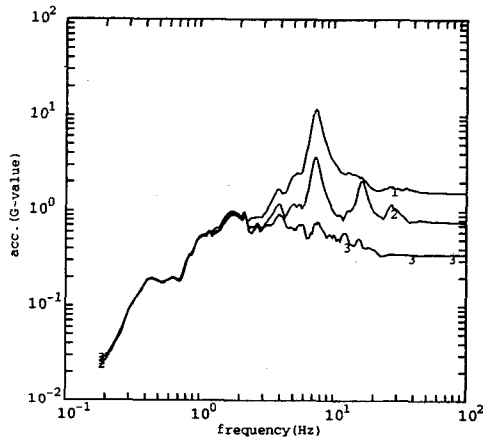


그림 3. Response Spectrum of Non-isolated Building (1940 EL Centro NS Earthquake)

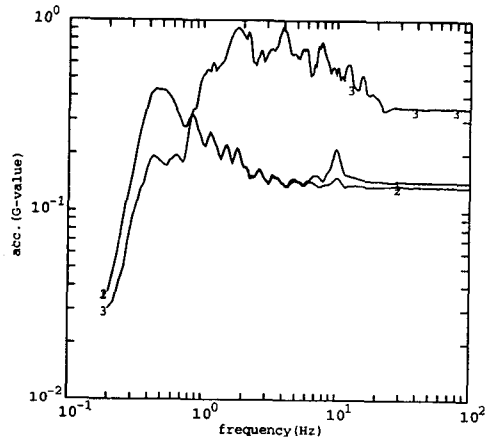


그림 4. Response Spectrum of Isolated Building (1940 EL Centro NS Earthquake)

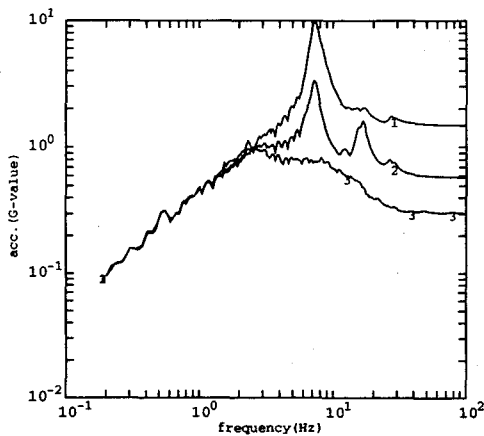


그림 5. Response Spectrum of Non-isolated Building (Artificial Time History Earthquake)

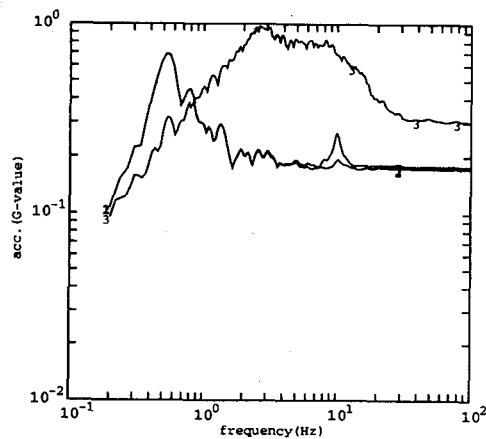


그림 6. Response Spectrum of Isolated Building (Artificial Time History Earthquake)