

KALIMER 원자로구조물의 면진성능 및 내진여유도 평가

유봉, 구경희, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문의 목적은 현재 국내에서 개념설계중인 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 원자로구조물에 대한 면진성능과 내진여유도를 평가하여 이들 성능을 향상시킬 수 있는 주요 설계변경 부위를 검토하는 것이다. 이를 위하여 ANSYS 범용 유한요소해석코드를 이용하여 원자로구조물에 대한 3차원 유한요소해석모델을 작성하고 이로부터 집중질량-스프링으로 이루어진 지진해석모델을 개발하여 지진해석을 수행하였다. KALIMER 원자로구조물에 대한 내진평가결과 내진능력(Seismic Capability)은 0.35g로 나타났으며 이는 Reactor Vessel Liner, Separation Plate 그리고 Support Barrel의 연결부위의 수직강성을 증가시키는 설계변경을 통하여 크게 향상될 수 있는 것으로 나타났다.

1. 서 론

현재 국내에서 예비개념설계로 개발되고 있는 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 액체금속로는 지진응답을 줄이고 경제성을 제고하기 위하여 지반에서 부터 상부구조물로 전달되는 지진에너지를 원천적으로 차단시킬 수 있는 면진개념을 설계에 도입하고 있다[1]. 이러한 면진개념은 현재 미국, 일본, 유럽 등 원자력선진국에서 자국의 액체금속로 면진을 위하여 적극적으로 개발중에 있다[2,3]. 본 논문에서는 예비개념설계의 일환으로 면진개념설계를 도입하고 있는 KALIMER 액체금속로 원자로 구조물에 대한 지진해석을 통하여 면진성능 및 내진여유도를 평가하고 내진여유도 향상을 위한 설계변경 방안을 연구하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 예비설계된 KALIMER 원자로 구조물에 대한 상세 유한요소모델을 작성하고 지진시간이력해석을 위한 집중질량-스프링 지진해석모델을 개발하였다. 개발된 해석모델들에 대하여 0.7 Hz의 수평면진주파수를 갖는 면진설계에 대한 KALIMER의 동특성해석, 지진시간이력해석 그리고 지진응력해석을 수행하여 원자로구조물에 대한 면진성능을 분석하고 등가 지진응력해석을 통하여 내진여유도를 평가하였다.

2. KALIMER 지진해석모델

2.1 3차원 유한요소모델

3차원 유한요소모델의 목적은 지진시간이력해석을 위한 집중질량-스프링 모델개발에 있어서 KALIMER 원자로구조물의 국부 상세 강성값을 계산하고 지진응력해석을 통해 내진여유도를 평가하기 위한 것이다. 사용된 해석프로그램은 ANSYS Version 5.2를 사용하였으며 전체 모델링에는 4절점 Shell 요소를 사용하였다. 그림 1은 KALIMER 원자로구조물의 예비개념도를 나타낸 것이며 그림 2는 이에 대한 3차원 유한요소모델을 나타낸 것이다.

비개념도를 나타낸 것이며 그림 2는 이에 대한 3차원 유한요소모델을 나타낸 것이다.

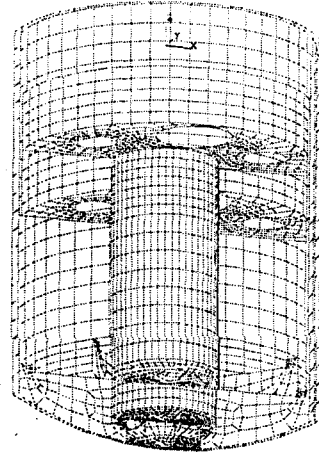
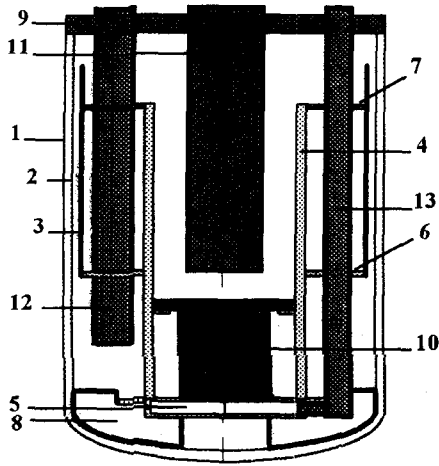


그림 1. KALIMER 원자로구조물 개략도

그림 2. 3차원 유한요소해석모델

표 1. KALIMER 원자로구조물 예비 개념설계자료

	Inner Dia.	Thickness	Material	Remark
1. Cont. Vessel	1145.0	2.5	2(1/4)Cr-1 Mo	
2. Reactor Vessel	1095.0	5.0	316SS	Gap with CV=20.0
3. RV Liner	1076.0	2.5	316SS	Gap with RV=7.0
4. Support Barrel	390.0	5.0	316SS	Gap with IHX=27.0
5. Inlet Plenum	380.0	15.0 (cylinder)	304SS	Upper Grid Plate t=15.0 Lower Grid Plate t=25.0
6. Baffle Plate	1076.0	2.5	316SS	with 6 holes
7. Separation Plate	1081.0	10.0	316SS	with 6 holes
8. Core Support	-	8.0	304SS	8 EA
9. Closure Head	1150.0	50.0	304SS	with 7 holes
10. Core	360.0	-	-	with shields
11. UIS	235.0	2.5	316SS	1 EA (Plug in-out Type)
12. IHX	280.0	2.0	304SS	2 EA
13. EM-Pump	156.0	2.0	304SS	4 EA

2.2 집중질량-스프링 모델

그림 3은 본 논문에서 개발된 KALIMER 지진해석모델로서 면진베어링을 포함하여 총 50개의 절점으로 구성되어 있다. 지진해석모델에서 원자로건물은 면진을 고려하여 강체로 가정하였으며 일체형 증기발생기는 모델에서 고려하지 않았다. 모델링에 사용된 일반적인 가정들은 다음과 같다.

- 원자로건물의 상부 및 하부기초매트의 회전자유도는 무시한다.
- 원자로건물, Collector 실린더 그리고 원자로 지지벽은 강체로 가정한다.
- 중간열교환기와 전자펌프는 Separation Plate 및 Baffle Plate 위치에서 수평방향으로 Support

- Barrel 에 바로 연계되어 있다.
- RV Liner 는 Separation Plate 와 Baffle Plate 을 통해 Support Barrel 에 연결되어 있다.
- 전자펌프 Inlet Pipe 는 Inlet Plenum 에 수평방향으로 연계되어 있다.
- 중간열교환기, 전자펌프 그리고 UIS(Upper Internal Structure)는 Closure Head 에 강체로 연결되어 있다.
- Closure Head 의 수평강성은 UIS 와 연계되어 있다.

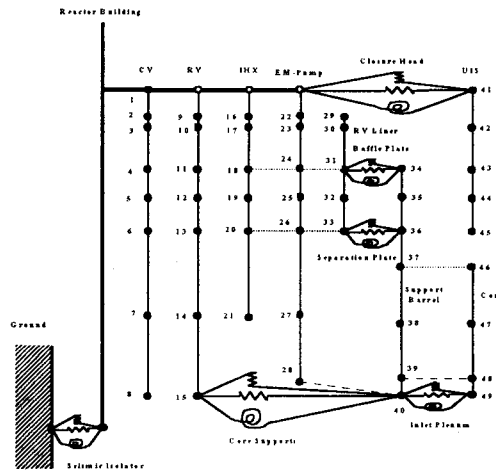


그림 3. KALIMER 집중질량-스프링 지진해석모델

일반적으로 면진베어링은 히스테레틱 비선형거동을 하며 이러한 비선형거동을 모델링하는 방법에는 현재 여러가지가 있으나[4,5] 본 논문에서는 등가선형모델을 사용하였다. 따라서 면진베어링의 수평강성(4.28×10^7 N/m)은 면진주파수, 0.7 Hz 를 고려하여 계산하였으며 수직강성(3.94×10^{10} N/m)은 21 Hz 고유진동수를 고려하여 계산하였다. 또한 면진베어링의 감쇠특성은 10%로 가정하였다. 일차소듐의 무게 750 톤은 작용점을 고려하여 임의 절점에 부가 질량으로 모델링하였다. 표 2 는 앞의 3 차원유한요소 해석모델을 이용한 상세 강성해석으로 부터 구한 원자로구조물 주요부위의 스프링상수를 나타낸 것이다.

표 2. KALIMER 원자로구조물 주요부위의 스프링상수

Items	Nodes	Horizontal Stiffness (N/m)	Vertical Stiffness (N/m)	Torsional Stiffness (N.m/rad)
Inlet Plenum	40 - 49	1.0×10^{13}	0.1434×10^{10}	0.2332×10^9
Separation Plate	33 - 36	0.2126×10^{11}	0.3853×10^8	0.1460×10^8
Baffle Plate	31 - 34	0.5315×10^{10}	0.6021×10^6	0.2282×10^6
Core Supports	15 - 40	0.7873×10^{10}	0.1804×10^{10}	0.2143×10^7
Closure Head	1 - 41	0.7709×10^{11}	0.2413×10^{10}	0.1623×10^{10}
Isolator	1 - 50	4.2818×10^7	0.3940×10^{11}	∞

3. KALIMER 내진해석 및 평가

본 논문에 적용된 내진해석 및 평가 절차는 다음과 같다.

- 앞에서 개발한 지진해석모델로 부터 모우드해석을 통한 KALIMER의 동특성을 분석한다.
- 지진시간이력해석을 통하여 원자로구조물에 대한 최대 침두가속도를 계산한다.
- 계산된 변위 및 가속도응답으로부터 KALIMER 내진요건에 대한 만족여부를 검토한다.
- 지진시간이력해석결과로부터 KALIMER 원자로구조물에 대한 지진응력해석을 위하여 등가지진하중을 결정한다.
- KALIMER 원자로구조물 3차원 유한요소모델에 대한 지진응력해석을 수행한다.
- 응력해석결과로부터 ASME 코드 부록 F[6]를 이용하여 내진여유도를 평가한다.
- 내진여유도 계산결과로부터 내진능력, SC(Seismic Capability)를 평가한다.

표 3은 KALIMER 원자로구조물에 대한 모우드해석결과를 나타낸 것이다. 수평방향에 대한 모우드해석결과 비면진시스템의 경우에 원자로용기를 포함한 내부구조물들의 1차고유진동수는 8.11 Hz이며 면진시스템의 경우에는 11.51 Hz로 나타났으며 이는 면진주파수 0.7 Hz와 비교하여 충분히 높은 것으로 나타났다. 수직방향의 경우에 고유진동수는 면진 및 비면진시스템의 모두 약 2 Hz, 8 Hz, 18 Hz 등으로 나타났으며 이는 입력지진의 강응답스펙트럼 주파수범위내에 존재하고 있어 지진가속도 응답이 증폭될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

표 3. KALIMER 원자로구조물 모우드해석 결과

Mode	Horizontal (Hz)		Vertical (Hz)	
	Isolation	Non-isolation	Isolation	Non-Isolation
1	0.7	8.11	1.87	1.87
2	11.51	11.88	8.09	8.25
3	13.69	18.81	17.77	17.94
4	21.04	27.85	23.08	34.26
5	27.90	27.97	34.85	36.59

지진시간이력해석에 사용된 입력지진스펙트럼은 U.S. NRC Reg. 1.60이며 OBE (Operating Basis Earthquake)의 경우는 0.15g, SSE(Safe Shutdown Earthquake) 경우는 0.3g 그리고 BDB(Beyond Design Basis)의 경우에는 1.0g의 최대 침두가속도값을 사용하였다. 표 4는 면진 및 비면진의 경우에 대하여 지진시간이력해석으로부터 구한 원자로구조물 주요부위의 최대 침두가속도응답을 나타낸 것이다.

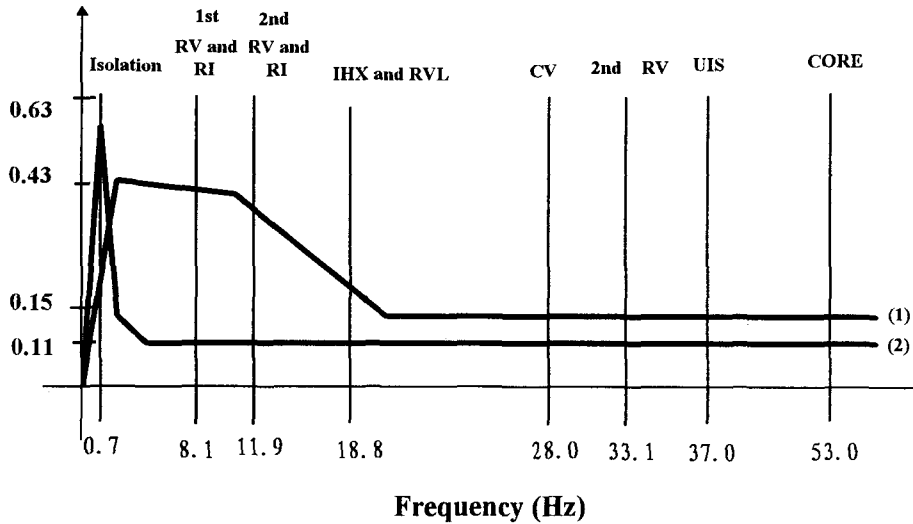
표 4. KALIMER 원자로구조물의 최대 침두가속도응답

Items	Horizontal ZPA (g)			Vertical ZPA (g)		
	OBE	SSE	BDB	OBE	SSE	BDB
CV	0.11(0.17)	0.22(0.34)	0.73(1.13)	0.15(0.14)	0.30(0.28)	1.00(0.93)
RV	0.11(0.64)	0.22(1.28)	0.73(4.27)	0.17(0.16)	0.34(0.32)	1.13(1.07)
IHX	0.11(1.56)	0.22(3.12)	0.73(10.4)	0.16(0.14)	0.32(0.28)	1.07(0.93)
EM-P	0.11(0.98)	0.22(1.96)	0.73(6.53)	0.16(0.14)	0.32(0.28)	1.07(0.93)
RV Liner	0.11(0.95)	0.22(1.90)	0.73(6.33)	0.97(0.97)	1.94(1.94)	6.47(6.47)
SB	0.11(0.92)	0.22(1.84)	0.73(6.13)	0.67(0.66)	1.34(1.32)	4.47(4.40)
UIS	0.11(0.15)	0.22(0.30)	0.73(1.00)	0.16(0.14)	0.32(0.28)	1.07(0.93)
Core	0.11(0.88)	0.22(1.76)	0.73(5.87)	0.94(0.91)	1.88(1.83)	6.27(6.07)

Note : () indicates for non-isolation system

표 4 예시와 같이 면진시스템의 경우에 수평방향에 대해서는 지진가속도응답증폭이 발생하지 않았으나 수직방향으로는 원자로 Liner, SB(Support Barrel), 노심(Core)의 응답증폭이 크게 발생하였다. 수평면진시스템은 비면진시스템에 비하여 수평방향 가속도응답이 최대 약 14배 정도 줄어드나 수직방향으로는 비슷한 응답결과를 나타내었다. 그림 4는 KALIMER에 대한 수평면진성능을 나타낸 것이다.

Accel. FRS (g)



- (1) : Acc. FRS at basemat for non-isolation system
- (2) : Acc. FRS at upper basemat for isolation system

그림 4. OBE 하중에 대한 KALIMER 수평면진성능

KALIMER 원자로구조물에 대한 내진여유도를 평가하기 위하여 표 4의 지진응답해석결과로부터 등가지진하중을 수평 OBE와 SSE의 경우에 각각 0.11g와 0.22g로 가정하고 수직인 경우에는 각각 1.97g와 2.94g로 가정하였다. 표 5은 원자로구조물에 대한 지진응력 해석 결과를 나타낸 것으로 원자로구조물에 발생하는 대부분의 응력은 수직지진응답으로 인하여 발생됨을 알 수 있다. SSE 지진하중은 구조물의 소성변형을 허용하는 하중조건으로 다른 하중조건들과의 조합없이 그 자체 하중만으로 구조물의 안전성을 검토할 수 있으며 따라서 표 6의 지진응력해석결과로부터 다음과 같은 ASME 코드 부록 F의 기준[6]을 적용하여 내진여유도를 평가할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min} [2.4S_m, 0.7S_u] &\geq P_m && \text{오스테나이트계 및 고합금강의 경우,} \\ 0.7S_u &\geq P_m && \text{페라이트계 재료의 경우} \\ 1.5P_m &\geq P_{L+b} && \end{aligned}$$

위의 기준에서 S_m , S_u , P_m 그리고 P_{L+b} 는 각각 허용응력, 인장강도, 막응력, 국부 막응력과 굽

힘응력합을 나타낸다. 표 6 은 KALIMER 원자로구조물 주요부위의 내진여유도평가결과를 나타낸 것으로 RV Liner, Support Barrel, Separation Plate 그리고 Baffle Plate의 내진여유도가 작은 것으로 나타났다. 본 논문에서는 KALIMER 원자로구조물이 견딜 수 있는 최대 침두지진하중을 평가하기 위하여 다음과 같이 내진능력(Seismic Capability)을 정의하였다.

$$\text{Seismic Capability} = \text{Min} [\text{Seismic Stress Margin} + 1] \times \text{SSE Load}$$

위의 식으로부터 예비 설계된 KALIMER 원자로구조물의 내진능력은 RV Liner에서 $1.18 \times 0.3g = 0.354g$ 로 나타났으며 예비로 평가된 KALIMER 원자로구조물의 내진능력은 Support Barrel/Separation Plate/ Reactor Vessel Liner가 만나는 위치에서 발생하는 고응력을 줄일 수 있도록 이 부위의 수직강성을 증가시키는 설계변경을 통하여 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서 예비설계된 KALIMER 원자로구조물에 대한 예비 면진해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- KALIMER 원자로구조물의 수평고유진동수 11.5 Hz는 면진주파수 0.7 Hz에 비하여 충분히 높으며 따라서 수평면진성능이 매우 뛰어나다.
- KALIMER 원자로 구조물의 수직고유진동수는 약 2 Hz, 8 Hz 등으로 매우 낮으며 이는 입력스펙트럼의 강응답주파수범위에 포함됨으로 높은 수직가속도응답 증폭이 발생하였다.
- KALIMER 원자로구조물 중에서 RV Liner, Support Barrel, Separation Plate 그리고 Baffle Plate의 내진여유도는 각각 0.18, 2.38, 1.14, 0.98로 나타났다.
- 예비로 평가된 KALIMER 원자로구조물의 내진여유도가 비교적 작은 원인은 Support Barrel/Separation Plate/ Reactor Vessel Liner가 만나는 위치에서 수직지진하중으로 발생하는 고응력 때문이며 따라서 이들 위치에서의 강성을 높이는 설계변경을 통하여 내진여유도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 5. KALIMER 원자로구조물 지진응력 해석결과

Items	Horizontal SI (MPa)		Vertical SI (MPa)		Total(H+V)* SI (MPa)	
	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE
	(0.11g)	(0.22g)	(1.97g)	(2.94g)		
Containment Vessel	0.6	1.1	10.9	16.6	14.1	21.4
Reactor Vessel	2.3	4.6	23.9	36.2	25.6	39.6
RV Liner	0.5	1.0	225.0	341.0	224.0	340.0
Support Barrel	1.8	3.6	60.7	92.0	74.8	113.0
Inlet Plenum	1.9	3.8	15.9	24.1	25.3	20.8
Separation Plate	0.28	0.6	124.4	188.5	124.0	188.0
Baffle Plate	0.9	1.7	127.3	192.9	127.0	193.0
Core Supports	5.8	11.5	40.4	61.2	45.7	72.1

* Responses for simultaneous Horizontal and Vertical Seismic Inputs

표 6. KALIMER 원자로구조물 내진여유도 평가결과

Items	σ_{SSE}^* (MPa)	P_{L+sb}^* (MPa)	Margins*
Containment Vessel	21.4	401.9	17.78
Reactor Vessel	39.6	401.9	9.15
RV Liner	340.0	401.9	0.18
Support Barrel	113.0	382.4	2.38
Inlet Plenum	20.8	401.9	18.32
Separation Plate	188.0	401.9	1.14
Baffle Plate	193.0	382.4	0.98
Core Supports	72.1	401.9	4.57

* σ_{SSE} = Total stress intensity for horizontal and vertical SSE loads

* $P_{L+sb} = 1.5 \times \text{Min} [2.4 S_m, 0.7 S_n]$

* Margin = $(P_{L+sb} / \sigma_{SSE}) - 1.0$

4. 참고문헌

- [1] 유봉, 구경희 등, KALIMER 면진 개념설계/해석, KAERI/TR-697/96, 1996.
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module(PRISM Liquid-Metal Reactor), Final Report, NUREG-1368, 1994.
- [3] H. Shiojiri, T. Matsuda, et. al, "Seismic Isolation for FBR-Preliminary Study," ASME, Seismic, Shock and Vibration Isolation-1989, PVP-Vol.181, pp. 115-120, 1989.
- [4] T. Fujita, S. Suzuki, et. al, "Hysteretic Restoring Force Characteristics of High Damping Rubber Bearings for Seismic Isolation," ASME, Seismic, Shock, and Vibration Isolation-1989, PVP-Vol.181, pp. 23-28, 1989.
- [5] 구경희, 이재한 등, "수정히스테레틱 Bi-Linear 면진베어링 모델을 사용한 지진응답감소," 대한기계학회논문집(A), 제 20 권 제 1 호, pp. 127-134, 1996.
- [6] ASME Code, Section III, Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits, 1989.