

면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석

Seismic Design and Analysis of Seismically Isolated KALIMER Reactor Structures

구 경 회* 이 형 연* 유 봉**
Koo, Gyeong Hoi Lee, Hyeong Yeon Yoo, Bong

국문요약

본 연구에서는 현재 국내에서 면진설계를 적용하여 개발중인 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 액체금속로에 대한 내진설계 및 지진해석을 위하여 핵심구조물인 원자로구조물에 대한 단순 지진해석모델을 개발하였다. 이를 이용하여 면진설계의 경우와 비면진 설계의 경우에 대한 동특성분석과 시간이력 지진해석을 수행하여 비교평가하였다. 또한 ASME 설계코드에 따른 응력한계요건을 검토하기 위하여 등가 지진응력해석을 수행하고 이로부터 내진여유도를 계산하였다. 지진안전성에 대한 하나의 지표로서 원자로구조물이 견딜수 있는 최대지진하중을 결정하기 위한 한계지진하중(Limit seismic load)을 정의하였다. 지진해석결과 면진된 KALIMER 원자로구조물은 비면진된 경우에 비하여 가속도응답과 구조물간의 상대변위응답이 현저히 감소하였고 충분한 내진여유도로 인하여 한계지진하중이 0.8g로 나타났다

주요어 : 액체금속로, 면진, 내진여유도, 한계지진하중

ABSTRACT

In this paper, the seismic analysis model for seismically isolated KALIMER reactor structures is developed and the modal analysis and the seismic time history analysis are carried out for seismic isolation and non-isolation cases. To check the seismic stress limit according to the ASME Code, the equivalent seismic stress analyses are performed using the 3-D finite element model. From the seismic stress analysis, the seismic margins are calculated for structural members. The limit of seismic load is defined to show that the maximum input acceleration ensures the structural safety for seismic load. In comparison of seismic responses between seismic isolation and non-isolation cases, the seismic isolation design gives significantly reduced acceleration responses and relative displacements between structures. The seismic margin of KALIMER reactor structure is high enough to produce the limit seismic load 0.8g.

Key words : liquid metal reactor, seismic isolation, seismic margin, limit seismic load

1. 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 KALIMER 액체 금속로는 기존의 경수로 또는 중수로 원자로와 비교하면 원자로의 구조측면에서 매우 상이한 특징을 가지고 있다.

일반적으로 경수로 원자로가 350°C, 150bar

정도에서 운전되는 것에 비하면 KALIMER 원자로는 530°C, 5bar의 고온/저압의 운전조건을 가지고 있다. 이러한 고온 운전설계조건으로 인하여 구조물에서 발생 가능한 열응력은 설계 여유도를 지배하는 실제적인 하중으로 작용하게 된다. 따라서 기본적인 구조설계 개념으로 열응력 발생을 최소화할 수 있는 얇은 두께의 박막구조설계가 필수적이다. 그러나 이러한 기본 구조설계 조건들은 구조물의 박막화로 인하여 지진하중에 매우 취약한 특성을 나타낼 수 있으며 따라서 지진응답해석과 지진좌굴해석

* 한국원자력연구소, 선임연구원, 공학박사

** 정희원 · 한국원자력연구소, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

등의 중요성이 기존 경수로에 비하여 상대적으로 훨씬 커지게 된다. 또한 원자로 노심구조를 살펴보면 기존의 경수로 핵연료와는 달리 핵연료가 육각형 단면의 덕트 내에 장착되며 총 379개의 덕트집합체가 하부 노심지판에 단순 고정된 외팔보 구조형상을 하고 있다. 따라서 이러한 노심구조는 기존의 경수로 노심집합체와는 달리 중간 지지구조체가 없기 때문에 지진하중에 매우 민감한 구조형상을 하고 있다.

KALIMER 설계에서는 이러한 고온 박막구조의 원자로구조물에 대한 지진건전성을 원천적으로 확보하기 위하여 원자로계통, 기기 및 부품에 전달되는 지진하중을 현저히 줄일 수 있는 면진설계(Seismic isolation design)⁽¹⁾를 도입하고 있다. KALIMER에 적용하기 위한 면진장치로는 얇은 고무판과 강판을 차례로 적층하여 만든 적층고무베어링(Laminated rubber bearing)이 사용되며 지반과 원자로건물 바닥층 사이에 설치된다. 면진용 적층고무베어링의 설계와 특성에 대한 연구는 현재 국내를 비롯한 원자력 선진국에서 활발히 진행되고 있다.^{(2),(3),(4),(5)}

본 논문에서는 KALIMER 원자로구조물에 대한 내진설계와 해석을 위하여 현재 진행중인 개념설계 자료에 근거하여 단순 지진해석 모델을 개발하고 이를 이용한 지진해석을 수행하였다. 지진해석에는 면진설계의 경우와 비면진설계의 경우를 각각 비교 평가하여 면진설계의 우수함을 입증하였다.

KALIMER 원자로구조물의 지진건전성을 평가하기 위하여 3차원 유한요소해석모델을 사용한 등가지진응력해석을 수행하고 안전정지 지진 하중에 대한 해석결과에 대하여 ASME Code, Section III, Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits의 설계규정에 따른 응력한계를 검토하였다. 그리고 면진된 원자로구조물 각 부위에 대한 내진여유도를 분석하였으며 설계측면에서 KALIMER 원자로구조물이 견딜수 있는 최대 지반입력가속도를 의미하는 한계지진하중(Limit seismic load)을 정의하고 검토하였다.

2. KALIMER 지진해석모델

2.1 KALIMER 원자로구조물 예비 내진설계

현재 국내에서 개발 중에 있는 KALIMER 원자로구조물 및 기기들의 세부 개념설계 형상과 명칭은 I-DEAS⁽⁶⁾로 작성된 Fig. 1과 같다. 그림에서와 같이 KALIMER 원자로는 격납용기(Containment vessel), 원자로용기(Reactor vessel), 내부구조물(Internal structure), 노심구조물(Core structure), 노내상부구조물(Upper internal structure), 중간열교환기(Intermediate heat exchanger), 그리고 전자펌프(Electro magnetic pump) 등으로 구성되어 있다.

KALIMER 원자로 격납용기는 기존의 가압 경수로와는 달리 원자로용기 바깥에 약 15cm의 간격을 두고 에워싸고 있는 원통형 실린더로서 원자로용기를 통한 일차 소듐냉각재의 누출을 감시하고 대량누출시에 원자로와의 환형공간사이에 소듐냉각재를 집적함으로써 노심용융사고를 방지하기 위한 구조물이다. 노심을 비롯한 모든

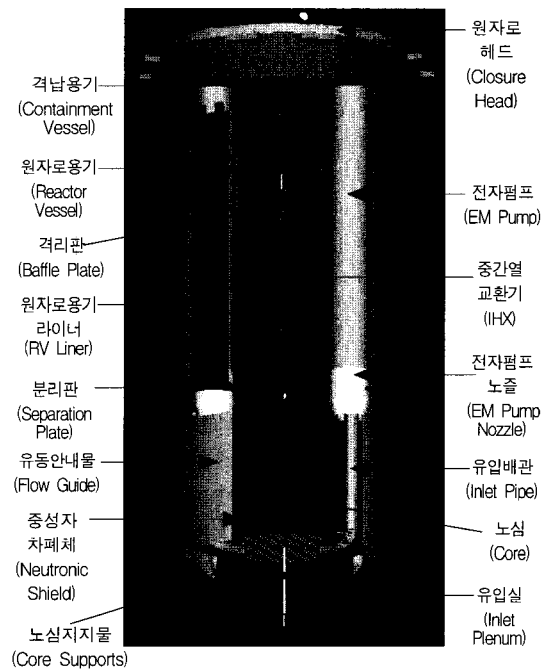


Fig. 1 Conceptually designed 3-D KALIMER reactor structures

원자로내부구조물을 지지하는 노심지지물은 Skirt형 구조물로 원자로용기 하부헤드와 유입실 하부판에 용접된다. 원자로내부구조물 중에서 원자로 라이너는 고온 소듐냉각재가 원자로 용기에 직접 접촉하는 것을 방지하기 위한 중요한 구조물이다. 격리판/분리판/지지배럴/원자로라이너로 구성된 캔형상의 구조물은 노심을 통과한 고온소듐 냉각재(530°C)와 중간열교환기를 나온 저온소듐 냉각재(387°C)와의 직접적인 경계를 이루는 구조형상을 배제하기 위한 설계개념이 적용된 것으로 고온 및 저온소듐냉각재의 온도차를 완화시키는 기능을 한다. 지지배럴은 기본적으로 노심을 나온 고온소듐냉각재를 중간열교환기로 안내하는 기능과 각종 내부구조물을 지지하는 중요한 구조물로서 노심지지구조물과 직접적으로 연결된다. 유동한 내물은 중간열교환기에서 나온 저온소듐냉각재가 지지배럴 외곽의 노심차폐체를 냉각시키면서 전자펌프를 통해 노심으로 자연스럽게 유입될 수 있도록 하는 기능을 가지고 있다.

Table 1은 본 연구의 지진해석에 사용된 150MWe 급 KALIMER 원자로구조물의 직경과 두께 그리고 재질에 대한 설계자료를 나타낸 것이며

Fig. 2는 각 구조물들의 높이에 따른 위치를 나타낸 것이다. Table 1에서와 같이 유입실(Inlet plenum)의 상하부판을 제외하고는 모든 원자로구조물의 두께가 약 5.0cm이하의 박막 구조이며 KALIMER 원자로용기는 직경 702.0cm, 두께 5.0cm 그리고 주용기 길이 1700.0cm로 박막의 긴 원통형 실린더 구조이다. 원자로 내부구조물의 support barrel을 포함한 고정구조물은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 원자로용기 하부헤드에 용접되어 있는 skirt형 노심지지구조물과 직접적으로 연결되어 전체 고정내부구조물은 외팔보 구조를 하고 있다. 그리고 원자로용기 상부헤드에 고정되어 내부에 장착되는 길이 1100cm, 직경 120cm의 중간열교환기 4개와 전자펌프 4개도 외팔보 구조형상의 기기들이다. 이러한 구조들은 모두 설계측면에서 단순화의 장점이 있는 반면에 수평지진하중에 매우 취약한 설계특성을 가지게 된다. 이러한 설계사항을 보완하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 격리판(baffle plate)과 분리판(separation plate)을 관통하는 기기들이 각각의 중간 및 끝단 위치에서 원자로 내부고정구조물과 수평적으로 상호 지지체 역할을 함으로써 외팔보

Table 1 Data for conceptually designed KALIMER reactor structures

Structures	Outer Dia.(Cm)	Thickness(Cm)	Material	Remark(Cm)
1. Containment Vessel	737.0	2.5	2(1/4)Cr-1Mo	Hemi-spherical bottom head
2. Reactor Vessel	702.0	5.0	316SS	Gap between RV and CV=15.0
3. RV Liner	687.0	2.5	316SS	Gap between RVL and RV=2.5
4. Support Barrel	374.3	5.0	316SS	Gap between SB and IHX=16.925
5. Inlet Plenum	374.3	15.0	316SS	Upper Grid Plate T=15.0 Lower Grid Plate T=25.0
6. Baffle Plate	687.0	2.5	316SS	Lower Baffle Plate T=2.5 Upper Baffle Plate T=2.5
7. Separation Plate	687.0	10.0	316SS	Circular Disk Type
8. Core Support	374.3(t) 454.3(b)	8.0 8.0	316SS	Skirt Type
9. Core	344.3	-	-	Gap between Core and SB=10.0
10. Closure Head	737.0	30.0	304SS	Circular Disk Type
11. Flow Guide	630.0	2.5	304SS	
12. Inlet Pipe	40.0	1.0	304SS	4 EA
13. UIS	140.0	2.5	316SS	

* O.D. of IHX (4EA)=120cm, * O.D. of IHX Riser=60cm, * O.D. of EM-Pump(4EA)=120cm

* T : Thickness, * t, b : top, bottom

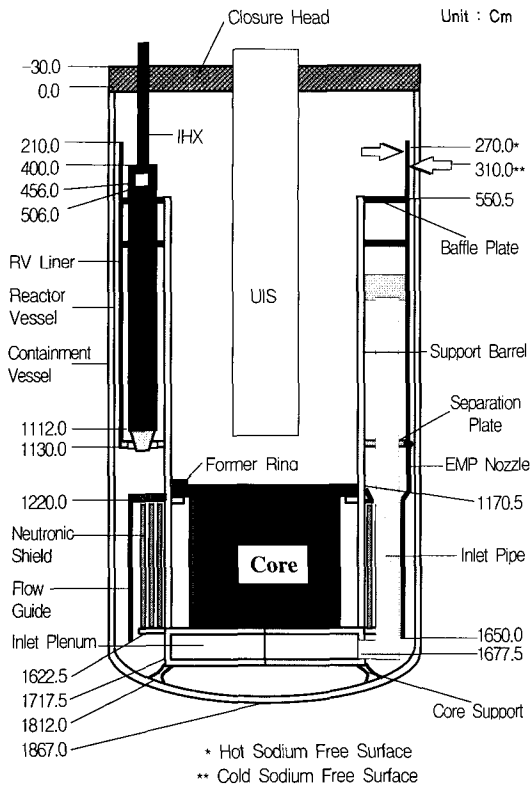


Fig. 2 Elevations of KALIMER reactor structures

구조형상이 갖는 단점을 최대한 보완하는 내진설계 개념을 채택하고 있다. 또한 유동안내물이 전자펌프노즐을 통해 분리판을 수직적으로 지지하는 구조형상을 하고 있어서 분리판의 수직강성이 증가하며 따라서 격리판/분리판/지지배럴/원자로라이너로 구성된 캔형상 구조물의 수직지진하중에 대한 취약성을 잘 보완해 주고 있다.

2.2 지진해석모델의 구성

Fig. 1의 개념설계도에서 보여주듯이 KALIMER 원자로구조물은 원자로내부구조물과 기기들 사이에는 매우 복잡한 구조적 연계특성을 나타낸다. 원자로구조물에 대한 지진응답특성을 평가하고 노심을 포함한 기기들의 설계 충응답스펙트럼을 생산하기 위해서는 지진해석모델 개발이 필수적이다. 지진시간이력해석을 위

한 해석 모델에는 원자로구조물 전체에 대한 유한요소 모델을 사용할 수 있으나 이는 컴퓨터 전산해석상 매우 비효율적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 원자력발전소의 시간이력지진해석에 사용되고 있는 집중질량스프링 요소로 구성된 Stick-model의 단순 지진해석모델을 개발하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 개발된 KALIMER 원자로구조물의 단순 지진해석모델을 나타낸 것으로 지반으로부터의 지진하중을 원자로구조물로 전달하는 원자로건물은 강체로 가정하였다.

그림에서와 같이 원자로용기를 포함한 모든 기기 및 장치들의 지지대 역할을 하는 원자로헤드는 격납용기, 원자로용기 그리고 기기들과 노내상부구조물간의 상대운동을 고려한 수평, 수직 그리고 회전스프링요소(절점1-절점41)로 결

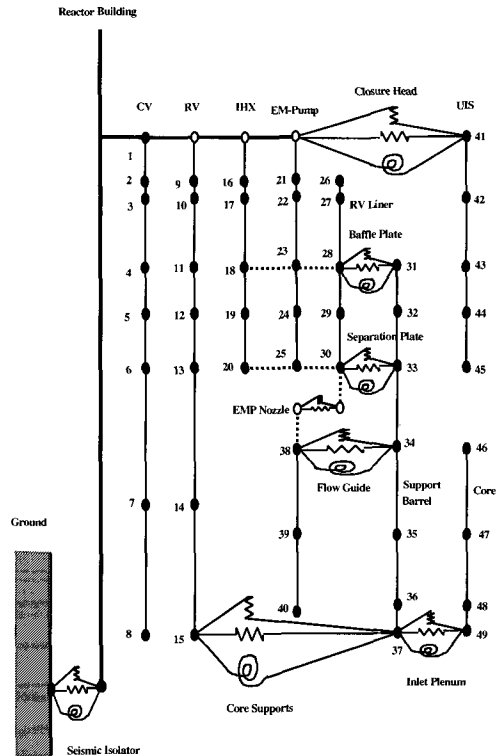


Fig. 3 KALIMER seismic analysis model

정하였다. 이는 노내상부구조물과 노심간의 상대변위에 대한 해석자료를 생산하여 주어진 설계지진에 대한 제어봉의 노심내 삽입기능요건과 Reactivity insertion요건 등을 검토하기 위한 것이다. 그리고 격납용기, 원자로용기 그리고 기기들을 고정지지하는 두께 30cm의 원자로헤드를 강체로 가정하여 고정지지점에서의 이들 상대변위는 무시하였다.

기기들과 원자로 내부구조물사이의 상호 수평결합을 제공하는 격리판과 분리판을 스프링요소(절점 28-절점 31, 절점 30-절점 33)로 처리하여 기기들과 내부구조물간의 수평강성 연계를 고려하였다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 중간열교환기와 전자펌프 그리고 원자로용기 라이너는 각각 격리판의 위치인 절점18, 절점 23 그리고 절점28과 분리판의 위치인 절점20, 절점25 그리고 절점30에서 각각 수평방향에 대하여 강체로 연계되고 격리판과 분리판의 스프링요소는 이들 절점과 지지배럴의 절점31과 절점33으로 구성되어 있다.

유동안내관으로 유입된 저온냉각재를 전자펌프로 원활하게 공급시키기 위한 4개의 전자펌프노즐은 Fig. 3에서와 같이 분리판(절점 30)과 유동안내물 상부판(절점 38)을 연결하는 수평, 수직스프링요소로 모델링하였으며 이때 분리된 4개의 노즐구조를 고려하여 이들에 대한 전체 회전강성은 무시하였다. 그리고 전자펌프노즐과 연결되는 유동안내물의 상부판은 안내물의 측면실린더와 지지배럴을 연결하는 스프링요소로 모델링하였다.

원자로용기 하부헤드에 용접되는 Skirt형 노심지지구조물과 유입판 하부판을 스프링요소로 모델링하여 복잡한 하부구조물의 해석모델을 단순화시켰다.

379개의 덩트집합체로 구성된 원자로노심은 유입실 하부판(절점 49)에 고정지지되는 3개의 요소로 모델링하였다. 이러한 단순 질량-스프링모델은 일반적으로 사용되고 있는 Cluster Modeling Technique⁽⁷⁾을 사용하였다.

Table 2와 Table 3은 본 연구에서 개발된

KALIMER 원자로구조물의 수평 및 수직 지진 해석모델의 절점위치와 질량분포를 나타낸 것이다. 표의 비교에 나타나 있는 V#은 Table 4에 나타나 있는 구조물 각 부위의 #번째 채적에 해당하는 소듐냉각재 질량을 나타낸 것이다. Table 5는 해석에 사용된 원자로구조물들의 보특성을 나타낸 것이다.

본 논문은 면진설계에 대한 KALIMER 원자로건물 및 원자로구조물은 강체거동을 한다는 가정하에서 원자로구조물의 면진성능 평가를 위하여 원자로건물은 질량을 무시한 강체로 가정하였다.

2.2.1 상세 유한요소 강성계산

위의 지진해석모델 기본개념에서 기술한 원자로헤드, 격리판, 분리판, 전자펌프노즐, 노심지지물, 유입실 하부판 그리고 유동안내물 상부판에 대한 스프링요소의 강성을 결정하기 위하여 ANSYS⁽⁸⁾에서 제공하는 Shell63 요소를 이용한 상세 유한요소해석을 수행하였다.

상부덮개에 대한 스프링상수를 구하기 위하여 노내상부구조물의 내부관통점을 경계조건으로하여 원자로헤드 원주둘레에 단위변위와 단위회전각을 적용하여 이때 발생하는 각 경계절점의 반력합을 스프링강성으로 결정하였다. 격리판, 분리판, 유동안내물 상부판에 대한 강성해석도 이와 마찬가지로 Fig. 4와 같이 지지배럴과의 접촉부위를 경계조건으로하여 외곽원주 부위에 단위변위와 단위회전각을 적용하여 강성평가를 수행하였다. 전자펌프노즐과 노심지지물에 대한 강성해석은 하부면을 경계조건으로 하고 상부면에 단위변위를 적용하는 방법으로 스프링강성을 결정하였다. 유입실 하부판의 수평강성은 25cm의 설계두께를 고려하여 강체로 가정하였으며 수직강성 평가에는 Fig. 5와 같은 노심집합체와의 연계를 고려한 변형형상을 가정하고 하부판의 중앙점을 경계조건으로 외곽원주 부위에 단위변위를 적용하는 방법을 사용하였다.

면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석

Table 2 Nodal locations and mass distributions for horizontal model

Node Number	Locations(m)	Mass(kg)	Remark
1	0.0	4724.6+13727+83000	CV+(RV+IHX+EMP)+CH
2	-2.1	6074.5	CV
3	-2.7	7649.4	CV
4	-5.5	12823.9	CV
5	-8.4	13048.9	CV
6	-11.3	13048.9	CV
7	-14.2	12823.9	CV
8	-17.0	6299.5+10594.3	CV+CVBH
9	-2.1	11528.7	RV
10	-2.7	14517.6	RV
11	-5.5	24338.4	RV
12	-8.4	24765.4	RV
13	-11.3	24765.4+11150.0	RV+V12/2
14	-14.2	24338.4+38380.0	24338.4+38380.0
15	-17.0	11955.7+29898+56993.2	RV+(RVBH+CS)+(V3/2+V1)
16	-2.1	2600.5	IHX
17	-2.7	4894.8	IHX
18	-5.5	8205.9+6266.7	IHX+V8/3
19	-8.4	8349.9+6266.7	IHX+V8/3
20	-11.3	4174.9+6266.7	IHX+V8/3
21	-2.1	3887.0	EMP
22	-2.7	4894.8	EMP
23	-5.5	8205.9+5686.7	EMP+V13/3
24	-8.4	8349.9+5686.7	EMP+V13/3
25	-11.3	4174.9+5686.7	EMP+V13/3
26	-2.1	5661.0	RVL
27	-2.7	7128.6+31530.0	RVL+V11
28	-5.5	11951.0+1607.5+59224.3	RVL+BP/2+(V7/3+V10)
29	-8.4	12160.6+27046.7	RVL+V7/3
30	-11.3	6080.3+8077.0+27049.7	RVL+(SP/2+EMP/2)+V7/3
31	-5.5	6560.9+1607.5+11332.5	SB+BP/2+V9/4
32	-8.4	13121.8+11335.0	SB+V9/4
33	-11.3	8597.0+3968.2+11336.8	SB+SP/2+V9/4
34	-12.2	6589.2+2940.7+19238.8	SB+FR+(V9/4+V5*/3)
35	-14.2	9106.0+7904.5	SB+V5*/3
36	-16.3	4553.0+73710.4+7908.6	SB+(IP/2+NS+NSS+P)+V5*/3
37	-17.3	15766.6+2134.5	IP/2+0.3V2
38	-12.2	6623.6+17009.7	FG/3+V4/3
39	-14.2	6623.6+17009.7	FG/3+V4/3
40	-16.5	6623.6+17009.7	FG/3+V4/3
41	0.0	1179.3	UIS
42	-2.8	2358.0	UIS
43	-5.6	2385.0	UIS
44	-8.4	2385.0	UIS
45	-11.2	1179.3	UIS
46	-11.7	54979.3+1500.0	Core+V**5/3
47	-14.0	54979.3+1500.0	Core+V**5/3
48	-16.3	54979.3+1500.0	Core+V**5/3
49	-17.3	10000.0	Nose piece
Total Mass		1228044.0	

V# : Primary Sodium Mass of Volume # in Table4

EMP/2 : EM Pump Nozzle

V*5 : Duct Assembly Outer Sodium Mass (23713 kg)

NS : Neutronic Shield

V**5 : Duct Assembly Inner Sodium Mass (4500 kg)

NSS : Neutronic Shield

P : Inlet Pipe

FR : Former Ring

면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석

Table 3 Nodal locations and mass distributions for vertical model

Node Number	Locations(m)	Mass(kg)	Remark
1	0.0	4724.6+13727.0+83000	CV+(RV+IHx+EMP)+CH
2	-2.1	6074.5	CV
3	-2.7	7649.4	CV
4	-5.5	12823.9	CV
5	-8.4	13048.9	CV
6	-11.3	13048.9	CV
7	-14.2	12823.9	CV
8	-17.0	6299.5+10594.3	CV+CVBH
9	-2.1	11528.7	RV
10	-2.7	14517.6	RV
11	-5.5	24338.4	24338.4
12	-8.4	24765.4	RV
13	-11.3	24765.4	RV
14	-14.2	24338.4	RV
15	-17.0	11955.7+29898+157550	RV+(RVBH+CS)+(V1+V3+V4+V12)
16	-2.1	2600.5	IHX
17	-2.7	4894.8	IHX
18	-5.5	8205.9+9395.0	IHX+V8/2
19	-8.4	8349.9	IHX
20	-11.3	4174.9+9395.0	IHX+V8/2
21	-2.1	3887.0	EMP
22	-2.7	4894.8	EMP
23	-5.5	8205.9+8530.0	EMP+V13/2
24	-8.4	8349.9	EMP
25	-11.3	4174.9+8530.0	EMP+V13/2
26	-2.1	5661.0	RVL
27	-2.7	7128.6	RVL
28	-5.5	11951.0+1607.5+40081.3	RVL+BP/2+(V30/2+V7/4)
29	-8.4	12160.6	RVL
30	-11.3	6080.3+8077.0+20285.0	RVL+(SP/2+EMP/2)+V7/4
31	-5.5	6560.9+1607.5+40081.3	SB+BP/2+(V30/2+V7/4)
32	-8.4	13121.8	SB
33	-11.3	8597.0+3968.2+20285.0	SB+SP/2+V7/4
34	-12.2	6589.2+2940.7	SB+FR
35	-14.2	9106.0	SB
36	-16.3	4553.0+73710.4+93170.4	SB+(IP/2+NS+NSS+P)+V9+V5+V20
37	-17.3	15766.6+4564.5	IP/2+0.3V2+V6
38	-12.2	6623.6	FG/3
39	-14.2	6623.6	FG/3
40	-16.5	6623.6	FG/3
41	0.0	1179.3	UIS
42	-2.8	2358.0	UIS
43	-5.6	2358.0	UIS
44	-8.4	2358.0	UIS
45	-11.2	1179.3	UIS
46	-11.7	54979.3	Core
47	-14.0	54979.3	Core
48	-16.3	54979.3	Core
49	-17.3	10000.0+4500.0	Nose piece+V**5
Total Mass			1228044.0

V# : Primary Sodium Mass of Volume # in Table 4
V20 = $(3.14 D_{sb}^2/4) (826.77)(2.8)=24117.4$
V30 = V10+V11 V20 = 39592.6
V*5 : Duct Assembly Outer Sodium Mass (23713 kg)
V**5 : Duct Assembly Inner Sodium Mass (4500 kg)

P : Inlet Pipe
EMP/2 : EM Pump Nozzle
NS : Neutronic Shield
NSS : Neutronic Shield Suppo
FR : Former Ring

Table 4 Calculated volume and weight of primary sodium

Volume Regions	Volume (m ³)	Weight (tons)	Remark
Volume 1 (RV Bottom Head)	34.402	29.76	Cold
Volume 2 (Inlet Plenum)	8.230	7.12	Cold
Volume 3 (Outside of Flow Guide)	62.964	54.46	Cold
Volume 4 (Inside of Flow Guide)	58.991	58.991	Cold
Volume 5 (Core)	34.000	28.00	Hot V_o+V_d **x 0.3
Volume 6 (Inlet Pipe x 4)	2.809	2.43	Cold
Volume 7 (Baffle Zone)	95.211	81.14	Medium
Volume 8 (IHX x 4)	22.727	18.79	Medium $V_{cylinder} \times 0.8$
Volume 9 (From Above Core to SB Top)	54.843	45.34	Hot
Volume 10 (From SB top to IHX Cylinder Top)	38.926	32.18	Hot
Volume 11 (From IHX Cylinder Top to Hot Free Surface)	38.814	31.53	Hot
Volume 12 (From Flow Guide Top to Cold Free Surface)	25.780	22.30	Cold
Volume 13 (EM-Pump x 4)	19.720	17.06	Cold $V_{nozzle} + V_{cylinder} \times 0.8$
Volume 14 (From RV Liner Slot Top to Hot Free Surface-Gas)	17.603	-	
Volume 15 (Inert Gas)	55.036	-	
Total	570.056	421.14	

* V_o : Outside volume of duct assemblies in core region
 ** V_d : Inside volume of duct assemblies in core region

• Hot Sodium Density = 826.77 kg/m³
 • Medium Sodium Density = 852.25 kg/m³
 • Cold Sodium Density = 864.98 kg/m³

Table 5 Beam properties of reactor structures and components

Structures	Outer Dia. (m)	Thickness (cm)	Sectional Area (m ²)	Area Moment of Inertia(m ⁴)
1. Containment Vessel	7.37	2.5	0.576875	3.890275
2. Reactor Vessel	7.02	5.0	1.094845	6.648912
3. RV Liner	6.87	2.5	0.537605	3.148662
4. Support Barrel	3.743	5.0	0.580095	0.989116
5. Inlet Plenum Cylinder	3.743	15.0	1.693161	2.737027
6. Core	3.443	-	0.803480	2.6151x10 ⁻³
7. Flow Guide Cylinder	3.35	2.5	0.261145	0.360910
8. UIS	1.4	2.5	0.107992	0.025530
9. IHX (x4)	1.2	2.5	0.369137	2.6379383
10. IHX Duct (x4)	0.6	2.5	0.1806416	1.2672
11. EM-Pump (x4)	1.2	2.5	0.369137	2.6379383
12. Reactor Support Wall	12.0	150.0	-	-
13. Nosepiece	-	-	0.457074	527.568x10 ⁶

Table 6은 원자로구조물에 대한 유한요소 강성해석으로부터 결정된 스프링강성값들을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 분리판을 포함한 각 구조물들은 설계 수평강성이 충분하며 격리판과 유동안내물 상부판의 수직강성과 회전강성은 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

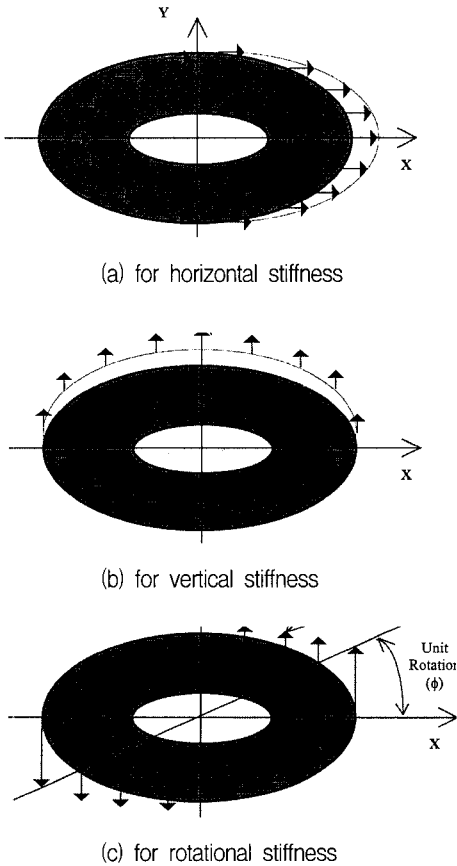


Fig. 4 Assumed deflection shapes of circular plate type structures

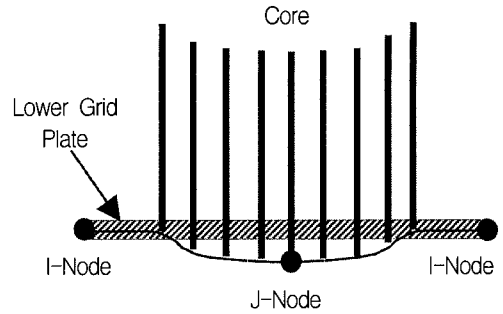


Fig. 5 Assumed deflection shape of lower grid plate

2.2.2 면진장치 모델링

KALIMER 원자로구조물에 대한 면진장치에는 얇은 고무판과 강판을 차례로 적층하여 만든 적층고무베어링이 사용된다. 이러한 면진장치는 구조 특성상 수직적으로는 매우 무거운 상부무게를 지탱하면서 지진하중이 작용할 경우에 안정된 수평변형으로 상부구조물이 자연스럽게 강체운동을 할 수 있도록 만들어 준다.

본 연구에서는 면진장치를 포함한 상부구조물의 수평고유진동수가 0.5Hz(면진설계주파수)가 되는 면진설계를 고려하였다. 복잡한 적층고무베어링의 동적거동에 대한 해석모델에는 여러가지가 있으나⁽⁹⁾ 본 해석에서는 단순 스프링-감쇠요소를 사용하였으며 Table 6에서와 같이 수평강성은 면진설계주파수 0.5Hz를 고려하여 11.8MN/m로 결정하였다. 이때 적층고무베어링의 수직강성은 21.0Hz의 면진장치 설계 고유진동수를 고려하여 21.4 GN/m으로 결정하였으며 회전강성은 무한대로 가정하였다.

Table 6 Calculated spring constants of KALIMER reactor structures

	Nodes	Horizontal Stiffness (N/m)	Vertical Stiffness (N/m)	Torsional Stiffness (N.m/rad)
Separation Plate	30 - 33	0.2728×10^{11}	0.2338×10^9	0.4888×10^7
Baffle Plate	28 - 31	0.6820×10^{10}	0.3653×10^7	0.7637×10^5
Inlet Plenum(Lower Grid Plate)	37 - 49	∞	0.1625×10^{10}	0.4183×10^9
Core Supports	15 - 37	0.6935×10^{11}	0.1464×10^{12}	0.1608×10^8
Flow Guide(Upper Plate)	34 - 38	0.1178×10^{11}	0.5732×10^7	0.1119×10^6
EMP Nozzle	30 - 38	0.6222×10^{10}	0.6173×10^{11}	-
Closure Head	1 - 41	0.4764×10^{11}	0.11891×10^{10}	0.3859×10^8
Isolation Device	1 - 50	11.8246×10^6	21.3714×10^9	∞

KALIMER 원자로건물의 면진장치로는 고감쇠 적층고무베어링이 사용되며 해석에 사용된 수평 및 수직 임계감쇠비는 각각 10%와 3%가 사용되었다.

3. 고유진동수 해석 및 결과논의

Fig. 6은 KALIMER 원자로구조물의 지진해석모델인 Fig. 3에 있어서 면진장치를 고려하지 않은 비면진설계의 경우에 대한 수평방향 고유진동수 해석결과를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 노심의 1차 수평고유진동수는 1.7Hz로 원자로구조물 중에서 가장 낮으며 원자로내부구조물을 포함한 원자로용기의 1차고유진동수는 6.9Hz 그리고 노내상부구조물은 9.2Hz로 이는 일반적인 강지진주파수 범위인 1.5Hz 10.0Hz을 고려하면 박막구조인 KALIMER 원자로구조물은 면진설계가 필수적임을 알 수 있다.

Fig. 7은 면진설계의 경우에 대한 수평방향 고유진동수해석 결과를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 원자로구조물 1차고유진동수는 0.5Hz의 면진 설계주파수를 나타낸다. 원자로구조물의 수평 고유진동수는 면진장치 수평강성과의 연계로 인하여 대부분 비면진설계의 경우에 비

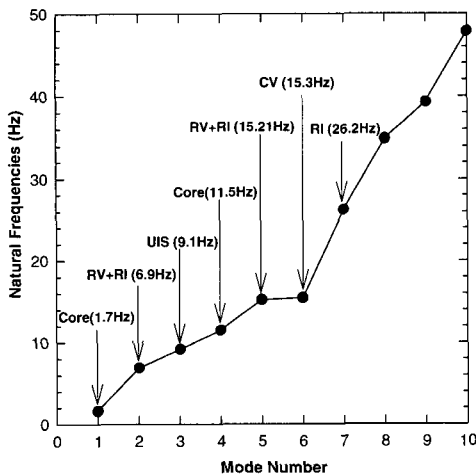


Fig. 6 Natural frequencies for horizontal direction in case of non-isolation

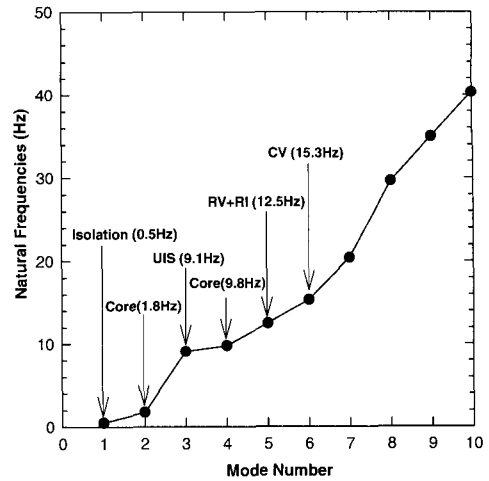


Fig. 7 Natural frequencies for horizontal direction in case of seismic isolation

하여 증가한다. 특히 원자로내부구조물을 포함한 원자로용기의 고유진동수는 12.5Hz에서 뚜렷한 1차모우드를 가지며 이는 앞서 설명한 강지진주파수 범위를 고려할 때 지진하중에 매우 유리한 동특성을 보여주고 있다. 이러한 KALIMER 원자로내부구조물의 동특성은 앞서 설명한 바와 같이 격리판과 분리판을 통한 중간열교환기 및 전자펌프와의 구조강성적 연계설계에 크게 영향을 받는다. 원자로 기기들과의 강성연계를 고려하지 않을 경우에 원자로 내부구조물의 고유진동수는 1.6Hz이며 이는 면진설계시 지진하중에 매우 취약한 구조형상으로 나타나게 된다.

Fig. 8은 면진설계된 원자로구조물의 수직방향 고유진동수 해석결과를 나타낸 것으로 원자로용기 라이너의 1차고유진동수가 6.6Hz에서 가장 먼저 나타난다. 전자펌프노즐을 통한 분리판과 유동안내물 상부판의 수직연계구조는 원자로용기 라이너의 수직고유진동수를 증가시키며 이는 원자로내부구조물의 수직강성 증가를 의미하는 것으로 구조응력발생 측면에서 아주 유리하다.

적층고무베어링을 사용하는 면진장치의 설계 수직주파수 21.0Hz가 원자로구조물의 3차 수직

고유진동수로 나타나며 이는 비면진설계에 비하여 수직지진응답을 증가시키는 역할을 한다. 따라서 이러한 면진장치의 수직고유진동수의 영향은 적층고무베어링을 사용한 수평 면진설계에 해결해야 하는 하나의 문제점이 되고 있으며 해결안으로서 3차원 수평-수직 면진장치에 대한 연구가 현재 진행중이다.⁽¹⁰⁾

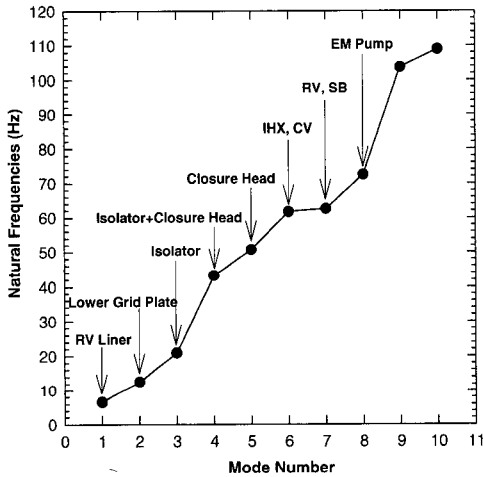


Fig. 8 Natural frequencies for vertical direction in case of seismic isolation

4. 시간이력 지진응답해석

4.1 입력 지진파형

해석에 사용된 수평 및 수직 설계입력지진은 운전기준지진 (OBE : operating basis earthquake) 0.15g와 안전정지지진 (SSE : safe shutdown earthquake) 0.3g이며 Fig. 9와 같은 인공지진 파형에 대해 일정 비율을 곱하여 이들 두 지진하중의 최대 첨두가속도를 만족하도록 하였다. 안전관련 원자로구조물의 지진해석에 사용되는 수직지진성분은 수평지진파형에 대해 2/3에 해당하는 크기를 사용하도록 하고 있으나⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 개념설계된 KALIMER 원자로구조물에 대한 보수적인 지진해석을 위해 수평성분과 동일한 크기의 지진하중을 사용하였다. Fig. 10은 운전기준지진 파형에 대한 응답 스펙

트럼을 나타낸 것으로 강지진주파수가 15Hz 10.0Hz 범위에 존재한다. ANSYS를 이용한 지진해석에 사용된 인공지진파형은 0.01초의 시간간격으로 작성되었으며 총 지진해석시간은 21초이다.

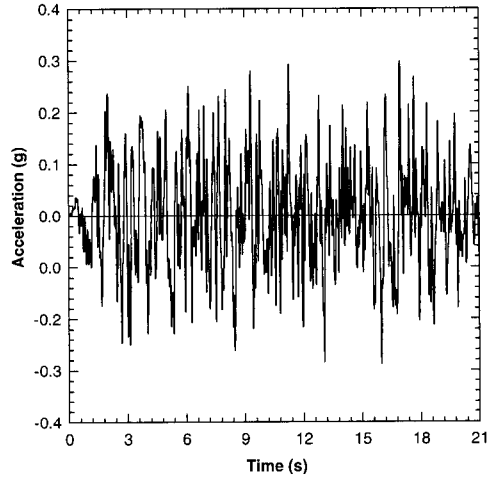


Fig. 9 Input artificial acceleration time history

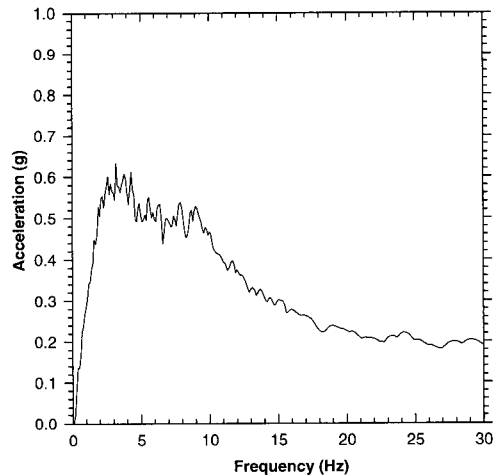


Fig. 10 Input ground response spectrum

4.2 가속도 지진응답 특성

시간이력 지진해석에 사용된 원자로구조물의 감쇠는 운전기준지진의 경우에는 임계감쇠의 3%, 안전정지지진의 경우에는 5%를 적용하였다. 면진설계의 경우 입력지진에 대한 원자로

하부헤드(절점 15)에서의 수평과 수직 가속도 시간이력응답은 각각 Fig. 11, Fig. 12와 같다. 그림에서와 같이 수평 가속도응답 파형은 약 2초의 면진주기를 갖는 조화응답 특성을 나타내며 수직 가속도응답은 매우 복잡한 응답특성을 나타낸다. 면진설계된 원자로구조물은 운전기준지진과 안정정지지진의 입력지진에 대하여 수평 가속도응답의 증폭은 전혀 발생되지 않으며 오히려 입력지진의 절반이상으로 현저히 감소하는 결과를 나타내었다. 그러나 수직 입력

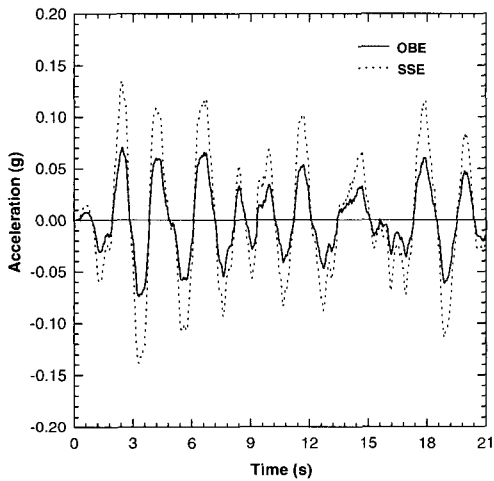


Fig. 11 Horizontal acceleration responses at RV bottom (node 15)

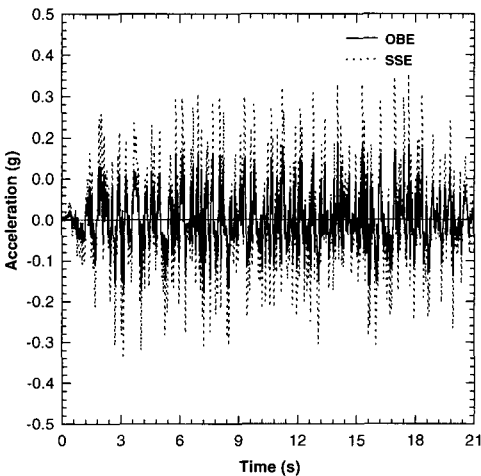


Fig. 12 Vertical acceleration responses at RV bottom (node 15)

지진에 대해서는 입력지진에 비하여 구조물의 가속도응답이 증가함을 알 수 있다. 설정된 운전기준지진 하중은 안정정지지진 하중의 절반인 0.15g이지만 원자로구조물의 감쇠가 운전기준지진의 경우에 임계감쇠의 3%, 안정정지지진의 경우에는 5%를 사용한 관계로 실제 운전기준지진에 대한 지진가속도응답은 안정정지지진 하중에 대한 응답의 절반이상으로 나타난다. 따라서 운전기준지진 하중은 실제 구조물의 건전성평가를 위한 지진응력해석을 수행할 경우에 구조물에 작용하는 하중조합에 따라서 안정정지지진 하중조건 이상으로 설계여유도에 큰 영향을 미칠 수가 있다.

Fig. 13은 안정정지지진 하중에 대한 면진설계와 비면진설계시의 원자로 하부헤드에서의 수평 총응답스펙트럼을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 원자로내부구조물을 포함한 원자로 용기의 1차고유진동수 6.9Hz 근방에서 비면진설계의 경우에 면진설계와 비교하여 약 40배의 가속도응답 증폭이 발생하며 영주기 가속도응답 (Zero-period acceleration)의 증폭은 약 7배로 나타났다. 수직 총응답스펙트럼의 경우에는 Fig. 14와 같이 면진설계의 경우가 비면진설계에 비하여 지진응답 증폭이 조금 크게 발생하며 이는 면진설계시 적층고무베어링의 면진장치가 나타내는 수직고유진동수의 영향 때문이다.

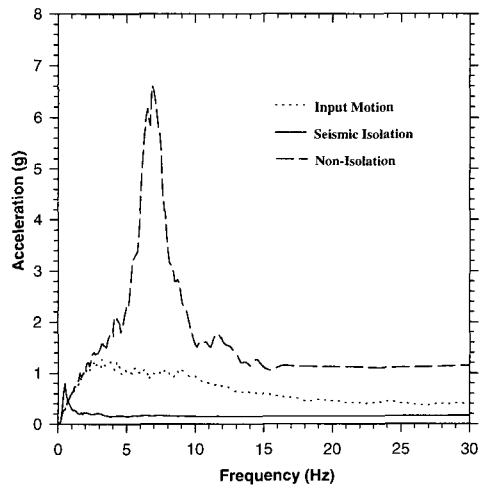


Fig. 13 Horizontal FRS at RV bottom for SSE load

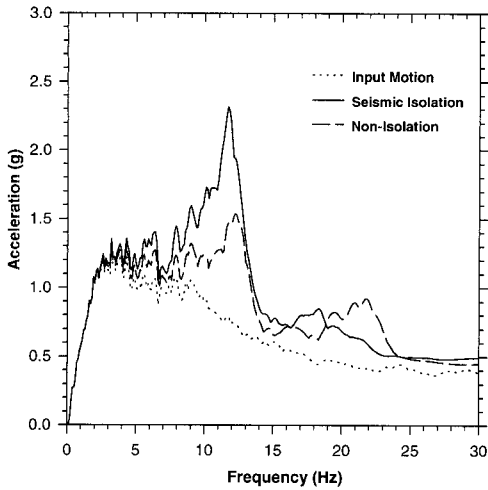


Fig. 14 Vertical FRS at RV bottom for SSE load

Fig. 15는 면진장치를 고려한 지진해석모델의 각 절점에 대한 최대 수평첨두가속도 응답해석결과를 나타낸 것으로 모든 원자로구조물들의 응답이 입력지진가속도 수준보다 작게 나타났다. 응답결과로부터 노심을 제외한 모든 구조물들의 가속도응답이 거의 동일하게 나타난다는 사실은 적절한 면진설계제도입할 경우 지진하중에 대해 면진장치 위에 지지된 모든 원자로구조물 및 기기들의 강제운동을 유도할 수 있고 내진설계시 수평지진

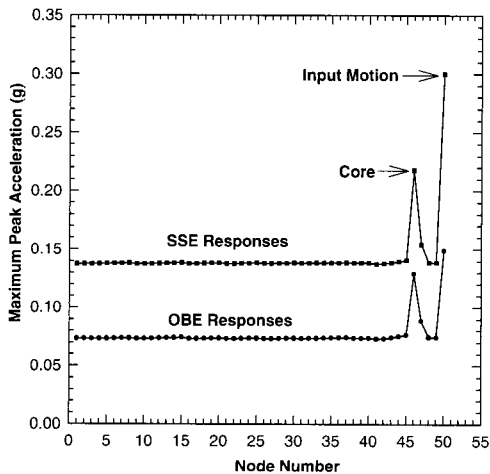


Fig. 15 Horizontal maximum peak acceleration responses for each node

응답의 증폭가능성을 완전히 배제시킬수 있음을 의미한다.

Fig. 16은 각 절점에서의 최대 수직첨두가속도 응답해석결과를 나타낸 것으로 모든 원자로구조물들의 응답이 입력지진가속도 수준보다 크게 나타났다. 특히 원자로용기 라이너, 유동안내물 그리고 노심에서의 수직 응답증폭이 매우 크게 발생하였다. 이러한 이유는 Fig. 1에서와 같이 원자로용기 라이너가 격리판 및 분리판과 연결되어 지지배럴에 외팔보구조 형상으로 지지되어 있으며 유동안내물도 이와 마찬가지로 유동안내물 실린더가 수평상부판과 연결되어 지지배럴에 외팔보구조로 지지되어 수직 지진하중에 매우 취약한 구조형상을 하고 있기 때문이다. 노심의 경우에는 Fig. 8에 보인 것과 것과 같이 노심집합체를 포함한 하부격자판의 1차 수직고유진동수인 12.6Hz가 강지진주파수 근처에 존재하고 있기 때문이다.

Fig. 17은 면진설계와 비면진설계의 경우에 대한 최대 수평첨두가속도 응답 해석결과를 각 절점에 대하여 비교한 것으로 앞서 논의한 것과 같이 면진설계의 경우에는 응답수준이 거의 동일하지만 비면진설계의 경우에 모든 원자로구조물 및 기기들에서 급격한 지진가속도 응답증폭이 발생함을 보여준다.

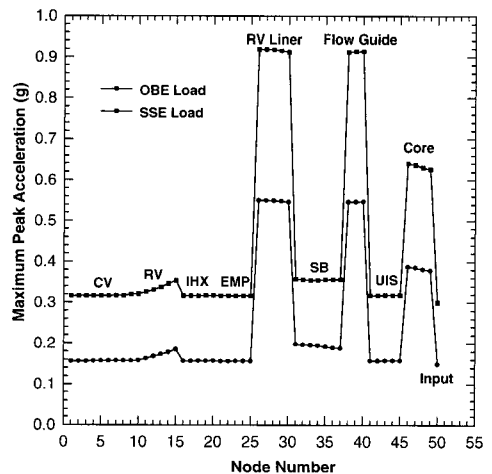


Fig. 16 Vertical maximum peak acceleration responses for each node

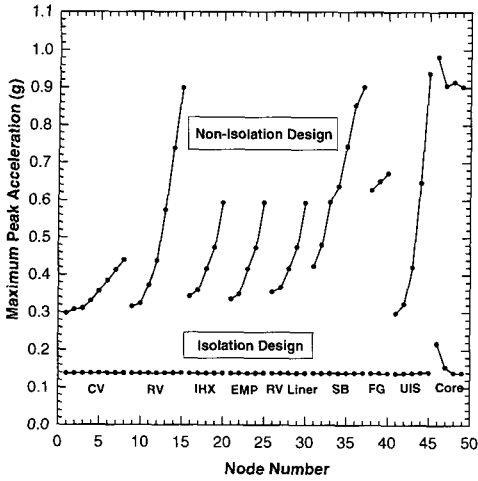


Fig. 17 Comparison of max. horizontal peak accel. responses between seismic isolation and non-isolation design

Fig. 18은 면진설계의 비면진설계의 경우에 대한 최대 수직침두가속도 응답해석결과를 나타낸 것으로 2차원 수평면진을 위한 적층고무베어링을 사용할 경우에 비면진설계에 비하여 전반적인 수직가속도응답이 다소 증가하는 단점을 보여준다. 일반적으로 2차원 수평면진설계를 적용할 경우에 수평지진하중에 대한 현저한 지진응답 감소효과를 보장할 수 있다는

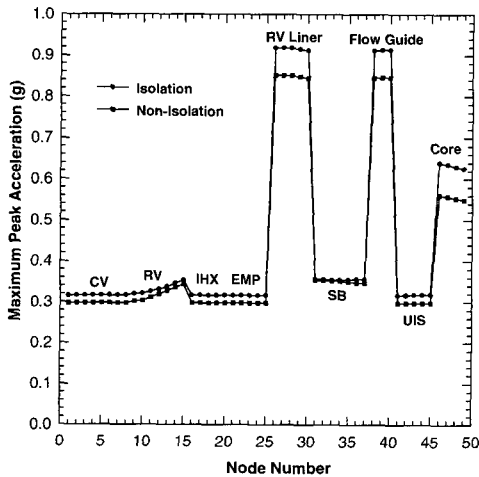


Fig. 18 Comparison of max. vertical peak accel. responses between seismic isolation and non-isolation design

1차적인 장점을 고려하여 약간의 수직가속도 응답증폭의 역효과 발생을 감수하는 2차원 면진설계가 행하여지고 있으나 고배지진과 같이 수직직하형 지진이 발생할 가능성이 있는 원전부지에 대해서는 이러한 단점을 고려하여 보다 신중하게 적용할 필요가 있다.

4.3 상대변위 지진응답 특성

설계지진들에 대한 원자로구조물의 변형한계조건으로서 지반과 면진구조물 간의 상대변위, 노내상부구조물과 노심간의 상대변위 지진응답은 KALIMER 액체금속로에 대한 기능 및 구조설계에 있어서 매우 중요한 설계조건들이다.

Table 7은 면진장치의 수평변위응답과 노내상부구조물과 노심의 상대변위응답을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 면진설계의 경우 최대설계지진하중인 안전정지지진 하중시에 면진장치의 최대 수평변위는 약 13cm로서 이는 KALIMER 면진장치용으로 개발되고 있는 직경 120cm, 총고무두께 27.84cm 적층고무베어링의 약 50% 전단변형률에 해당한다. 따라서 축소규모 적층고무베어링을 사용한 실제 전단변형 특성실험에서 적층고무베어링은 300% 전단변형이상에서도 충분히 안정된 전단변형특성을 나타낸 점을 고려할때⁽¹²⁾ 면진장치의 전단변형 여유도는 매우 큰 것으로 나타났다. 원자로구조물 전체 시스템에 대한 면진장치의 수평변형 정도는 면진시스템과 비면진시스템 사이의 연결계통 설계에 매우 중요한 요건이 된다.

Table 7 Relative displacement responses of KALIMER

Design Conditions	Loads	Seismic Device		UIS/Core Closure/Core	
		Horizontal (mm)	Vertical (mm)	Horizontal (mm)	Vertical (mm)
Seismic Isolation	OBE	71.706	0.143	0.143	0.740
	SSE	132.705	0.250	21.713	1.276
Non-Isolation	OBE	-	-	53.676	0.687
	SSE	-	-	77.919	1.110

운전기준지진 또는 안정정지지진이하 수준의 지진이 발생할 경우에 원자로 제어봉이 수직관성력으로 노심에 삽입되어야 한다. 이를 위하여 노내상부구조물과 노심 상부끝단과의 수평상대변위로 인하여 일차 원자로정지 기능이 영향을 받지 말아야 한다. Table 7에서와 같이 면진설계를 도입할 경우에 운전기준지진에 대해서는 1.29cm, 안정정지지진에 대해서는 2.17cm의 노내상부구조물과 노심 상부끝단과의 수평상대변위가 발생하며 이는 비면진설계에 비하여 약 4배의 응답감소 효과를 나타낸다.

원자로헤드와 노심간의 수직상대변위는 노심에 대한 반응도삽입(Reactivity insertion) 요건 만족에 매우 중요하다. 반응도삽입사고는 순간반응도삽입으로 인한 초임계발생과 주기적 반응도삽입으로 인한 핵연료과손 사고 등을 야기할 수 있다. 개념설계된 KALIMER 원자로의 경우에 Table 7에서와 같이 면진설계의 경우에 원자로상부덮개와 노심간의 수직상대변위는 비면진설계에 비하여 앞서 언급한 가속도응답 결과와 마찬가지로 약8%(운전기준지진의 경우), 15%(안정정지지진의 경우) 정도 증가하지만 모두 1.3mm이하의 매우 작은 수직상대변위응답을 나타냄으로써 지진에 의한 반응도삽입 요건을 충분히 만족할 것으로 예상된다.

5. 내진여유도 해석 및 평가

KALIMER 원자로구조물에 대한 내진여유도를 평가하기 위하여 등가지진응력해석을 수행하였다. 앞의 가속도응답에서 보인 바와 같이 면진설계의 경우에 원자로구조물은 지반에 대하여 거의 강체운동을 하며 따라서 모든 원자로구조물의 응답가속도 중에서 최대치를 입력지진하중으로 결정한 등가지진응력해석이 가능하다.

응력해석에 고려된 구조물은 격납용기와 원자로용기를 포함한 원자로내부구조물이며 보수적인 응력평가를 위하여 기기들과 원자로내부구조물 사이의 수평강성연계는 무시하였다.

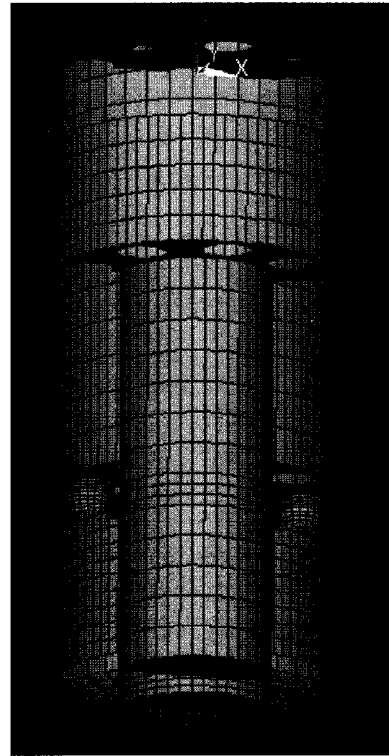


Fig. 19 Finite element model of reactor structures for equivalent seismic stress analysis

Fig. 19는 해석에 사용된 유한요소모델을 나타낸 것으로 ANSYS에서 제공하는 Shell63요소로 구성된 1/2대칭 셸모델이다.

Table 8은 KALIMER 원자로구조물 각 부위에 대한 응력해석 결과를 나타낸 것으로 수직지진에 대한 응력발생이 지배적임을 알 수 있다. 각 방향의 지진하중에 대한 응력조합을 위하여 SRSS(square root of sum of square)법을 사용하였으며 운전기준지진에 대한 응력값은 안전정지지진에 대한 응력값의 절반이상으로 크게 발생하였다. 응력해석결과에서와 같이 전자펌프노즐과 유동안내물의 수직응력이 크게 발생하였으며 이는 앞의 고유진동수해석에서 언급한 바와 같이 전자펌프노즐과 유동안내물이 분리판을 포함한 원자로용기 라이너의 지지역할을 하기 때문이다. 이로 인하여 분리판의 수직변형이 상당히 억제되고 따라서 이와 연계된 원자로용기 라이너, 격리판 그리고 지

Table 8 Results of equivalent seismic stress analyses of KALIMER reactor structures

Reactor Structures	Horizontal (S_x, S_y) (MPa)		Vertical (S_z) (MPa)		Total Stress ($S_x^2 + S_y^2 + S_z^2$) ^{1/2} (MPa)	
	OBE (0.075g)	SSE (0.14g)	OBE (1.55g)	SSE (1.93g)	OBE	SSE
Containment Vessel	0.61	1.14	3.80	4.73	3.90	5.00
Reactor Vessel	11.50	21.47	42.10	52.42	45.13	60.58
RV Liner	0.47	0.88	22.90	28.51	22.91	28.54
Support Barrel	1.07	2.00	8.74	10.88	8.87	11.24
Inlet Plenum	0.66	1.23	3.59	4.47	3.71	4.80
Separation Plate	0.73	1.36	30.90	38.48	30.92	38.53
Baffle Plate	0.61	1.14	12.10	15.07	12.13	15.16
EM Pump Nozzle	5.97	11.14	96.70	120.41	97.07	121.44
Flow Guide	7.48	13.96	120.00	149.42	120.47	150.72
Core Supports	8.81	16.45	32.00	39.85	34.34	46.14

지배력의 지진응력이 상당히 완화되는 결과가 나타났다.

KALIMER 원자로구조물의 지진응력해석 결과로부터 각 구조물부위의 내진여유도를 계산하기 위하여 다음과 같은 평가식을 사용하였다.

$$\text{Margin} = [(P_L + P_b) / \sigma_{sse}] - 1.0 \quad (1)$$

위의 식에서 P_L, P_b 는 ASME Code, Section III, Appendix F, Rules for Evaluation of Service Loadings with Level D Service Limits⁽¹³⁾에 규정된 국부 일차막응력강도(Local primary membrane stress intensity)와 일차굽힘응력강도(Primary bending stress intensity)를 각각 나타내며 응력해석을 통한 계산에 의하여 구해진다. 그리고 σ_{sse} 는 ASME 설계코드에서 규정하는 허용응력(Allowable Stress)을 나타낸다. 안전정지지진은 설계하중 분류상으로 운전조건 D에 해당하며 이에 대한 응력해석결과는 ASME Code, Section III, Appendix F의 설계규정에 따라서 응력한계요건을 검토할 수 있다.

식 (1)에 사용된 허용응력 σ_{sse} 를 결정하기 위하여 재료성질에 따른 다음과 같은 응력한계요건을 검토한다.

$$\text{Min} [2.4S_m, 0.7S_u] \geq P_m \quad \text{for austenitic and high alloy steels,} \quad (2)$$

$$0.7S_u \geq P_m \quad \text{for ferritic materials} \quad (3)$$

위의 식에서 P_m, S_m 그리고 S_u 는 각각 구조물의 일반 일차막응력강도(General primary membrane stress intensity), 설계응력강도(Design stress intensity) 그리고 인장강도(Tensile strength)를 나타낸다.

$(P_L + P_b)$ 는 아래의 요건과 같이 일반 일차막응력강도 P_m 에 대한 한계값의 150%를 초과해서는 안된다.

$$1.5P_m(P_L + P_b) \quad (4)$$

고온(530°C) 및 저온(38°C) 냉각재에 접하는 구조물의 설계응력강도 S_m 은 각각 106.20MPa, 111.65MPa이며 인장강도 S_u 는 각각 382.0 MPa, 422.0 MPa이다. 이를 고려하여 위의 식 (2)와 (3)으로부터 냉각재온도에 따른 응력한계요건은 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} &\text{고온냉각재 조건}(530^\circ\text{C}) : \\ &P_m \leq \text{Min}[2.4S_m, 0.7S_u] = 2.4S_m = 254.9\text{MPa} \\ &(P_L + P_b) \leq 1.5P_m = 1.5 \times 254.9 = 382.4\text{MPa} \end{aligned}$$

저온냉각재 조건(387 °C) :

$$P_m \leq \text{Min}[2.4S_{m}, 0.7S_u] = 2.4S_m = 268.0\text{MPa}$$

$$(P_L + P_b) \leq 1.5P_m = 1.5 \times 268.0 = 401.9\text{MPa}$$

Table 9는 위와 같은 응력한계값으로부터 식 (1)을 적용하여 계산된 KALIMER 원자로 구조물 각 부위의 내진여유도를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 대부분의 원자로구조물은 위의 응력한계요건을 모두 만족하며 높은 내진여유도를 나타낸다. 그러나 유동안내물과 전자펌프노즐 구조물의 내진여유도가 1.67, 2.31로 각각 평가됨으로써 다른 구조물에 비하여 상대적으로 지진하중에 취약한 구조부위로 나타났다.

면진설계된 KALIMER 원자로구조물에 대한 한계 입력지반가속도의 크기를 결정하는 것은 지진에 대한 구조안정성을 확보할 수 있는 또 하나의 지표가 될 수 있다. 본 연구에서는 계산된 원자로 각 부위의 내진여유도를 이용하여 다음식과 같은 한계지진하중(Limit seismic load)을 정의하였다.

$$\text{한계지진하중} = (\text{Min [seismic stress margins]} + 1.0) \times \text{SSE Load} \quad (5)$$

Table 9 Seismic margins of KALIMER reactor structures

Part Name	Stresses $(P_L + P_b)^*$ (MPa)	σ_{SSE}^* (MPa)	Seismic Margins [†]
Containment Vessel	5.00	401.9	79.38
Reactor Vessel	60.58	401.9	5.63
RV Liner	28.54	401.9	13.08
Support Barrel	11.24	382.4	33.02
Inlet Plenum	4.8	401.9	82.73
Separation Plate	38.53	401.9	9.43
Baffle Plate	15.16	382.4	24.22
EM Pump Nozzle	121.44	401.9	2.31
Flow Guide	150.72	401.9	1.67
Core Supports	46.14	401.9	7.71

* $(P_L + P_b) = (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2)^{1/2}$: Calculated Stress

* $\sigma_{SSE} = 1.5 \text{ Mn} [24 S_m, 0.7 S_u]$: Allowable Stress

* Margin = $[(P_L + P_b) / \sigma_{SSE}] + 1.0$

위의 식 (5)로부터 KALIMER 원자로구조물에 대한 한계지진하중을 평가하기 위하여 Table 9에서 나타난 최소 내진여유도 1.67를 고려하면 한계지진하중은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{한계지진하중} = (1.67 + 1.0) \times 0.3g = 0.8g$$

따라서 개념설계된 KALIMER 원자로구조물의 한계지진하중은 0.8g로 안전정지지진의 약 2.7배로 나타났다. 이러한 한계지진하중은 최소 내진여유도를 나타낸 유동안내물을 기준으로 결정된 것이므로 유동안내물의 지진응력발생을 지배하는 수직강성을 증가시킴으로써 크게 향상시킬 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서 개발된 KALIMER 액체금속로의 원자로구조물에 대한 지진해석모델개발 및 지진해석절차는 개발중인 액체금속로 또는 핵융합로의 원자로 등의 개념설계시 지진응답평가와 기기들에 대한 내진설계하중 생산에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

KALIMER 원자로구조물은 각각 외팔보 구조형상의 원자로내부구조물과 기기들이 끝단과 중간부위에서 서로 격리판과 분리판을 통해 수평적으로 강성연계되어 있고 수직적으로는 유동안내물이 전자펌프노즐을 통하여 분리판에 연결되어 수직강성이 취약한 원자로 라이너 등의 지지역할을 함으로써 지진하중에 대한 구조설계가 잘 반영되어 있다. 지진시간 이력해석결과 면진설계된 KALIMER 원자로구조물은 비면진설계 경우에 비하여 가속도응답과 구조물간의 상대변위응답이 현저히 감소하였으며 이러한 효과는 가속도와 상대변위에 대한 각종 구조설계요건을 충분히 만족시킬뿐만 아니라 노심을 포함한 모든 원자로구조물의 내진설계를 매우 단순화시킬 수 있다.

안전정지지진에 대한 면진설계된 KALIMER 원자로구조물의 등가지진응력해석결과 대부분

의 원자로구조물은 ASME Code, Section III, Appendix F의 응력한계요건을 만족하며 상당히 높은 내진여유도를 나타냈다. 최소 내진여유도를 보인 유동안내물을 기준으로 한계지진하중을 평가한 결과 0.8g로 나타났으며 이는 안정정지지진의 2.7배이다.

일반적으로 지진하중은 원자력발전소의 설계여유도를 지배하는 아주 중요한 설계하중이다. 따라서 면진된 원자로구조물은 지진하중의 격감효과를 최대한 활용하는 내진설계가 이루어져야 한다. 본 연구에서 수행한 KALIMER 원자로구조물의 내진여유도와 한계지진하중 평가절차를 통해 열응력을 최소화시킬수 있는 최적의 박막구조물 설계와 배관지지물 설계단순화 등을 수행할 수 있으며 이로부터 경제성 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Shiojiri, H, Matsuda, T., and et. al., "Seismic isolation for FBR-preliminary study," *Seismic, Shock, and Vibration Isolation-1989*, ASME PVP, Vol. 181, pp. 115-120.
- Fujita, T., Suzuki, S., and Yoshizawa, T., "Experimental study of laminated rubber bearings for earthquake isolation of buildings," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 53, No. 485, 1987, pp. 71-76.
- 구경희, 이재한, 유봉, "면진용 적층고무베어링의 기계적 역학특성", 한국지진공학회 논문집, 제1권 제2호 (통권 제2호), 1997, pp. 79-89.
- 구경희, 이재한, 유봉, "면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호 (통권 제8호), 1998, pp. 73-85.
- Koo, G.H., Lee, J.H., Yoo, B., and Ohtori, Y., "Evaluation of laminated rubber bearings for seismic isolation using modified macro-model with parameter equations of instantaneous apparent shear modulus," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 594-602.
- "Exploring I-DEAS Design," Volume I and II, SDRC, 1998.
- Koo, G.H., Lee, J.H., and Yoo, B., "Core seismic analysis for a seismically isolated LMR," *Seismic, Shock, and Vibration Isolation*, ASME PVP, Vol. 379, 1998, pp. 221-227.
- Swanson analysis systems, Inc, "ANSYS User's Manual for Version 5.5," Volume I,II,III.
- Koo, G.H., Lee, J.H., and Yoo, B., "Seismic response analyses of seismically isolated structures using the laminated rubber bearings," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 30, No. 5, 1998, pp.387-395.
- 구경희, 이재한, 유봉, "KALIMER 원자로 구조물에 대한 3차원면진설계 적용가능성 분석", KAERI/TR-1065/98, 한국원자력연구소, 1998, 35 pp.
- "Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary on standard for seismic analysis of safety related nuclear structures," American Society of Civil Engineers, 1986, 91 pp.
- 유봉, 이재한, 구경희, "액체급속로용 축소 규모 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 특성 시험결과 분석", KAERI/TR-809/97, 한국원자력연구소, 1997, 121 pp.
- "Rules for construction of nuclear power plant components division 1 appendices, appendix F : rules for evaluation of service loadings with level D service limits," ASME Code, Section III, 1998.