2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 KALIMER 상부내부구조물 구조 동특성 및 지진응답해석

Dynamic Characteristics and Seismic Response Analyses of Upper Internal Structure of KALIMER Liquid Metal Reactor

이재한, 유 봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

손재홍
충남대학교 기계공학과 석사과정

요 약

액체금속로 KALIMER 원자로 상부내부구조물의 구조적 측면에 대한 개념설계정립을 위해 상부내부구조물에 대한 3 차원 입체모델링과 ANSYS 구조해석 프로그램을 이용한 고유진동수 해석 및 지진응답변위 해석을 수행하였다. 상부내부구조물은 원자로용기 내부 소듐에 대부분이 잠겨 있는 구조물로 고유진동수 해석에서 소듐이 구조물 고유진동수에 주는 영향을 평가하였다. 원통 실린더 한쪽에 슬롯이 없는 상부내부구조물의 1 차 고유진동수는 3.77Hz 로 나타났고, 슬롯이 있는 상부내부구조물은 3.5Hz 로 나타났다. 면진시스템을 채택한 원자로건물의 경우 0.3g 영주기 가속도를 갖는 인공지진하중에 대한 지진응답스펙트럼 해석결과 상부내부구조물 하단부에서 최대 수평지진응답변위가 0.83cm 로 계산되어 제한값 2.5cm 이내에서 충족하였다.

Abstract

For the preliminary concept design for upper internal structure (UIS) of KALIMER, 3D solid modeling of UIS using IDEAS, dynamic characteristics and seismic response analyses are performed. Sodium and structure interaction effects are analyzed in frequency analysis of UIS submerged in sodium pool. In FEM analysis the fundamental frequency of UIS cylinder with an open slot is 3.5 Hz, but the one without the slot is 3.77 Hz. For the reactor building with a base-isolated system under the earthquake load with a zero period acceleration of 0.3g in horizontal direction, the maximum horizontal displacement at UIS bottom is calculated by 0.83cm, which is within the design displacement limit of 2.5cm.

1. 서론

액체금속로 원자로 상부내부구조물(Upper Internal Structure, UIS)의 주요 기본적 기능은 제어봉 구동축의 수평지지, 소듐 유체기인진동으로부터 제어봉 구동축(driveline) 보호, 노심 상부에 위치한 계측기 지지, 노심에서 방출되는 소듐의 혼합촉진, 노내 핵연료교환기(IVTM) 지지역할 등이다[1]. 상부내부구조물은 길이가 10m 이상이고 직경이 크지 않은 원통실린더 형태이며, 상단이 원자로헤드에서 지지되는 단순 외팔보 형태로 굽힘과 회전운동이 가능하다[2]. 상부내부구조물은 한쪽이 개방된 원통형 구조로 노내 핵연료교환기가 노심 핵연료집합체에 접근할 수 있도록 한다[1].

액체금속로는 수평방향 면진설계를 채용하므로 상부내부구조물 고유진동수가 면진주파수에 근접하는 것을 피해야 하며, 구조물은 유동기인진동에도 영향을 받지 않아야 한다. 이 때문에 구조설계에서 어쩔 수 없이 면진주파수와 유동기인진동과 관련이 있는 주파수에 근접한 상부내부구조물의 고유진동수가 존재하는 경우 많은 주의가 필요하다. 상부내부구조물의 중요한 기능은 지진하중에 의한 수평변위가 일정 값 범위에 존재하여 어떤 경우에도 제어봉의 삽입/인출이 가능하여 노심제어기능을 잃지 않도록 하는 것이다. 상부내부구조물의 지진설계는 구동축과 주위 부품사이에서 강제된 3 점 간섭이 없도록 본 연구에서는 2.5cm 의 지진변형 제한치를 설정한다.

본 논문에서 원자로 상부내부구조물 3 차원 입체 모델링 및 동특성해석을 위한 해석모델은 예비설계 단계인 KALIMER 원자로 설계치수를 기본으로 작성하였다. 해석 내용은 첫째로 원자로 상부내부구조물에 대한 예비적인 3 차원 입체모델을 IDEAS 프로그램[3]으로 작성하고, 둘째로 원자로 상부내부구조물의 동특성해석을 위해 단순모델 가정에 따른 1 차 고유진동수의 존재 가능 범위를 단순 외팔보 이론식으로 계산하고, 좀더 실제모델에 가깝고 상세한 해석을 위해 ANSYS 구조해석 프로그램[4]으로 측면 개방공간이 없는 상부내부구조물에 대하여 유한요소모델을 작성하고 소듐 부가질량 모델을 개발하였다. 개발된 부가질량 모델링 방법을 이용하여 측면 개방공간이 있는 실제 상부내부구조물 모델에 대한 구조 동특성 해석을 수행하였다. 또한 0.3g 수평 및 0.2g 수직 설계지진하중에 대한 원자로건물 지진응답시간이력 해석결과[5]를 이용하여 원자로용기 지지점 위치의 지진응답 스펙트럼 하중을 구하고, 이를 적용하여 상부 내부구조물 지진응답가속도 해석을 수행하고 수평 변위한계 및 구조적 건전성을 검토하였다.

2. 상부내부구조물 3 차원 입체 모델링

가. 원자로 상부내부구조물 치수

개념설계 중인 KALIMER 상부내부구조물의 상부 원통직경은 노심 직경 내에 있는 6 개의 제어봉 구동축 보호관이 포함되도록 최대 140cm 로 정하였다. 원자로 상부내부구조물 원통실린더 두께는 고유진동수 해석결과에 따라 달라질 수 있으나 현재로는 2.5cm 와 5.0cm 로 한다. 설계된 KALIMER 원자로 상부내부구조물의 3 차원 입체모델에 사용된 주요치수는 다음과 같다.

상부원통 외부직경	= 140cm,	두께	= 2.5cm,	길이(상부) =	500cm
중간원통 외부직경	= 74cm,	두께	= 5.0cm,	전체길이 =	468cm
하부원통 외부직경	= 140cm,	두께	= 2.5cm,	길이(하부) =	92cm
중간연결평판 두께	= 10cm ,	하단연결평판 두께		=	10cm

이로부터 전체 상부내부구조물의 길이는 10.6m 가 된다. 원자로 상부내부구조물 내에는 6 개의 제어봉구동축 보호관과 3 개의 중성자계측대 보호관이 존재하며, 원통실린더에 의해서 지지 되고 있다. 원통실린더는 노내 핵연료교환기가 내부로 접근할 수 있도록 개방공간이 존재한다. 개방공간의 폭은 25cm 이고 개방공간이 시작되는 위치는 상단으로부터 1.5m 하단이다. 중간 위치에는 제어봉구동축과 열전대 보호관을 잡아주는 2.5cm 평판이 위치하고 있다.

IDEAS 구조설계 프로그램으로 작성한 상부내부구조물의 3 차원 입체모델 및 하단부 단면도를 그림 1 에 나타냈다. 그림 1 에는 상부내부구조물 길이 방향을 따라 앞에서 제시한 치수로 직경이 두 종류의 외부 실린더 원통과 6 개의 제어봉 보호관, 3 개의 중성자 계측대 보호관이 있으며, 오른쪽으로 하단부 바깥쪽 실린더와 이의 단면이 나타나 있다. 원통실린더에는 노내 핵연료교환기 수용 열림 공간(open slot)과 노내 핵연료교환기에 대한 하단지지대가 하부 원통실린더 끝면으로부터 돌출되어 있다. 각 부품의 무게는 외부 실린더 무게가 9.1 이고, 하부 원통실린더는 2.32 톤, 제어봉구동축 보호관 등이 1.32 톤 등으로 전체무게는 13.1 톤으로 계산되었다.

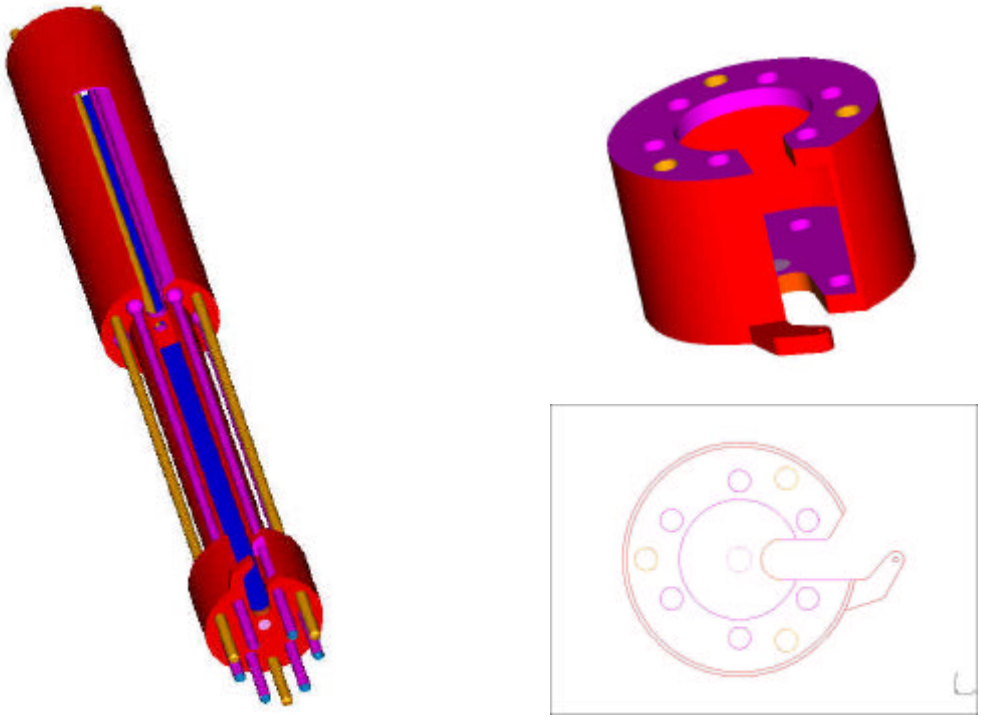


그림 1. 상부내부구조물 3 차원 입체모델

3. 상부내부구조물 동특성해석

상부내부구조물에 대한 구조 동특성 해석은 첫째로 상부내부구조물 원통을 1 자유도를 갖는 외팔보라는 가정에 의한 이론식으로 수행하고, 둘째로 ANSYS 구조해석 프로그램을 이용하여 소듐을 유체요소로 모델링 한 경우와 소듐을 부가질량으로 모델에 도입한 경우에 대해 수행하였다.

가. 단순 1 자유도계를 도입한 고유진동수 해석

상부내부구조물을 단일 원통직경을 갖는 단순 1 자유도계로 모델링 할 경우 단순 외팔보로 이

루어진 모델이 된다. 공기 중에 있는 길이가 l 인 원통실린더의 고유진동수는 다음과 같다.

$$f_n = \frac{(0.597p)^2}{2p}\sqrt{\frac{EI_{cyl}}{l^4 m}}$$, m = Mass per Unit Length , I_{cyl} =moment of inertia.

구조물에서 전체 원통실린더 길이가 10.6m 이고, 원통의 외경이 1.4m, 내경이 1.35m 인 경우 1 과 외경이 0.74m, 내경이 0.64m 인 경우 2 를 설정하면 외팔보 식에 의한 고유진동수는 표 1 과 같고 소듐의 존재에 의해서 고유진동수는 각각 50%와 28% 씩 감소한다.

표 1. 단순화된 상부내부구조물의 1 차 고유진동수 계산결과

	단일 직경 원통실린더		제어봉 구동축 보호관/ 중성자 계측대 보호관
	경우 1 (외경 1.4m)	경우 2 (외경 0.74m)	
공기 중(Hz)	11.99	5.92	201.3
소듐 중(Hz)	6.03	4.3	58.9

나. 유한요소모델을 이용한 고유진동수 해석

1) 해석 모델링

원자로 상부내부구조물의 구조 동특성 해석을 위해 ANSYS 범용구조해석 프로그램[4]으로 모델링하였다. 유한요소모델에 사용된 요소는 shell 63 요소와 mass21 요소이다. 내부 소듐 유체를 3 차원 유체요소와 질량요소로 각각 모델링 한 두 경우를 그림 2 에 모두 나타냈다. 해석에 사용된 상부내부구조물의 재료인 스테인리스강과 소듐의 재료 물성치는 표 2 와 같다.

표 2. 스테인리스강과 소듐의 재료 물성치

스테인리스강		소 듐	
탄성계수	195.13 x 10^9 N/m^2	체적탄성계수	2.07 x 10^9 N/m^2
밀도	7965 Kg/m^3	밀도	850 Kg/m^3
포아송비	0.3	동적점성계수	0.95 x 10^{-3} m^2/sec

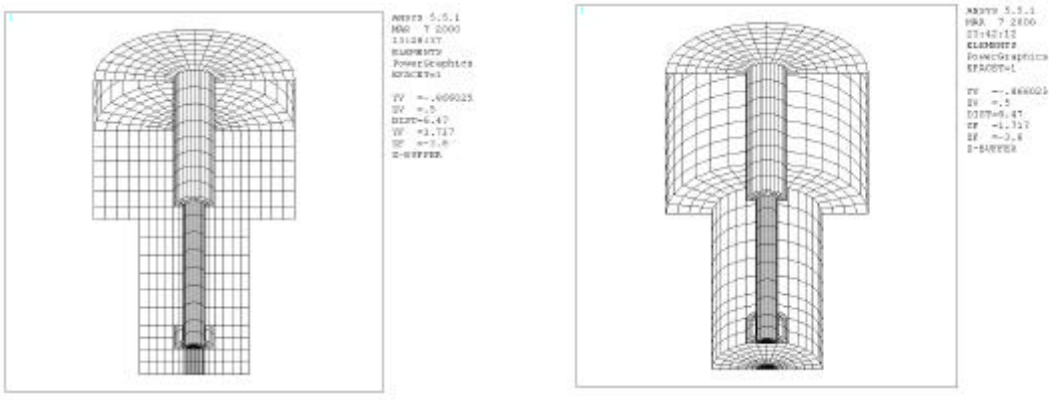


그림 2 상부내부구조물 동특성해석 모델

2) 유체의 부가질량 계산

강체 실린더(직경,*D*)로 갇혀 있는 점성유체 내에서 진동하는 실린더 봉(직경,*d*)에 대한 부가질량과 점성계수를 구하기 위한 해석적인 방법과 실험으로부터 얻어진 결과를 비교한 결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다[6,7]. 상부내부구조물에 대한 부가질량 계산에서 유체가 비점성이라는 가정하에 원통실린더 부위별로 계산한 수력질량계수 및 단위길이 당 부가질량은 표 3 에 나타냈다.

소듐의 높이는 원자로헤드로부터 약 2m 아래에 있는 라이너 상단 높이로 제한되는 것으로 한다. 이는 소듐과 접하는 상부내부구조물 상부 쪽 5m 중에 3m 만 소듐에 잠겨 있는 것으로 이를 고려하면 내/외부 소듐에 의해 전체 구조물의 밀도는 100% 이상 증가된다.

표 3. 상부내부구조물 부위별 수력질량계수 및 부가질량

UIS 실린더	원통외부직경/ 소듐경계직경(m/m)	Hydrodynamic Mass Coefficient (C_m)	Added Mass/Unit Length (Kg/m)	
			Outside Sodium	Inside Sodium
상부	1.40/ 6.87	1.09	1.09M2	1.0M2
중간(상)	0.74/ 6.87	1.03	1.03M1	1.0M1
중간(하)	0.74/ 3.74	1.08	1.08M1	1.0M1
하부	1.40/ 3.74	1.33	1.33M2	1.0M2
	M1 = $r_{sodium}\, p$ /4*(0.74)^2 =365Kg/m, M2 = $r_{sodium}\, p$ /4*(1.40)^2 = 1308.5Kg/m Cm =(1+((d/D)^2)/(1-(d/D)^2)			

3) 개방공간이 없는 경우의 고유진동수 해석

ANSYS 구조해석 프로그램을 이용한 상부내부구조물의 고유진동수 해석은 고유진동수에 영향을 주는 원통실린더 내부와 외부에 존재하는 소듐유체의 모델링 방법에 따라 두 종류를 수행했다. 하나는 부가질량으로 외부소듐만 고려한 경우와 내외부 소듐 모두를 고려한 경우이다.

가) 외부소듐만 고려한 구조물 고유진동수

내부 소듐을 제외한 상태에서 상부내부구조물 외부에 존재하는 소듐에 대한 좀더 간단한 부가질량 해석모델 개발을 위해 상부내부구조물 외부 소듐을 3 차원 유체요소(fluid 80)로 모델링하고, 유체와 구조물의 상호작용을 고려한 해석을 수행하였다. 해석결과에 대하여 3 차원 유체요소 대신 표 3 에서 계산한 부가질량계수(Hydrodynamic Mass Coefficient)를 적용하여 외부 소듐을 구조물 부가질량으로 환산하여 고유진동수를 계산한 결과와 비교하고, 부가질량 해석모델에 의한 해석결과의 타당성을 검토하였다.

내부 소듐을 제외한 해석결과에서 1 차 고유진동수는 표 4 에서 보는 바와 같이 소듐을 3 차원 유체요소로 모델링한 경우 4.07Hz 로, 소듐을 부가질량으로 모델링한 경우 4.4Hz 로 계산되어 둘 사이는 10% 정도 차이가 나타났다. 이러한 원인은 직경이 작은 중간원통 실린더 외부에 존재하는 소듐이 상대적으로 직경이 큰 상하 원통실린더에 의해 축방향으로 갇혀지는 현상에 의한 결과로 판단된다. 이러한 현상을 모델에 반영하기 위해 상하 원통에 의해 갇혀진 소듐 무게를 부가질량으로 모델에 추가했으며, 이 경우의 고유진동수 해석결과는 표 4 에 나타냈다. 표 4 에 나타난 바와 같이 1 차 고유진동수가 4.04Hz 가 되어 3 차원 유체요소를 사용한 결과 4.07Hz 와 1% 이내의 차이를 보이고 있다. 이로부터 수정된 부가질량 모델로 소듐을 모델링 한 경우는 3 차원 유체요소를

사용하여 모델링한 경우의 결과와 잘 일치 하는 것을 나타낸다.

표 4. 상부내부구조물 고유진동수 해석결과 경우 (내부 소듐 제외 경우)

MODE	(3D 유체요소 사용)		표 3 의 부가질량계수를 이용한 모델 (경우 1)		수정 부가질량계수를 이용한 모델(경우 2)	
	FREQUENCY	EFF. MASS	FREQUENCY	EFF. MASS	FREQUENCY	EFF. MASS
1	4.07108	6974.32	4.40655	5889.21	4.03972	7791.97
2	21.6836	4510.91	24.0790	3628.60	21.4656	3979.69
5	62.8089	364.526	69.6307	330.787	61.3738	374.020

나) 내외부 소듐을 고려한 고유진동수 해석결과

내부소듐은 전체가 갇혀진 형상이므로 내부 소듐 전체무게를 부가질량으로 모델링 하였다[8]. 이 경우의 고유진동수는 표 5 에서 보는 바와 같이 3.74Hz 로 계산되어 3D 유체요소를 이용한 결과와 일치하였다. 해석결과에서 내부 소듐을 고려한 고유진동수 해석모델의 결과가 내부소듐을 제외한 해석모델에 비하여 고유진동수가 약 8% 작게 나타났다.

계산시간은 소듐을 3 차원 유체요소로 모델링 한 경우에 11,405 초가 소요된 반면 유체요소를 배제하고 이의 영향을 부가질량으로 환산하여 해석한 경우는 계산시간이 440 초로 유체요소 사용 경우의 4% 정도로 매우 짧은 계산시간을 나타냈다. 한편 유한요소모델에서 계산한 고유진동수는 3.76Hz 는 상부내부구조물을 단일직경을 갖는 두 종류의 원통실린더로 가정하여 외팔보 이론식으로 각각 계산한 표 1 의 결과인 6.03Hz 및 4.3Hz 와 비교할 때 약간 낮은 값을 나타내고 있다.

표 5. 상부내부구조물 고유진동수 해석결과 (내부/외부 소듐 모두를 고려한 경우)

MODE	(3D 유체요소 사용)		수정 부가질량계수를 이용한 모델	
	FREQUENCY	EFF. MASS	FREQUENCY	EFF. MASS
1	3.76699	8404.75	3.74194	8849.7
2	19.3206	5894.82	19.2028	6075.3
5	55.9472	401.543	55.2605	511.737

4) 개방공간이 존재하는 경우의 고유진동수 해석

실제모델과 같이 상부내부구조물의 한 쪽에 노내핵연료교환기 접근이 가능한 개방공간이 존재하는 경우 해석모델은 약간 복잡해 진다. 개방공간은 그림 2 에 나타나 있는 바와 같이 원자로헤드로부터 1.5m 아래에서부터 상부내부구조물 하부 끝 단까지 폭과 깊이가 25cm x 50cm 인 공간이 형성되어 있다. 이 경우는 유한요소해석 모델에서 평면 대칭이라는 가정이 부적합하기 때문에 원통 전체에 대한 해석모델이 요구된다. 이러한 개방구조는 구조물 거동을 좀 더 복잡하게 만들기 때문에 소듐을 3D 유체요소로 함께 모델링 하기가 쉽지 않다. 이러한 이유로 앞서 부가질량 해석모델의 정확성에 근거를 두고 소듐을 부가질량요소 형태로 상부내부구조물 쉘요소 모델에 반영하는 부가질량 해석모델을 작성하였다.

해석 내용은 개방공간이 있는 상부내부구조물에 대하여 유체요소를 부가질량으로 고려한 유한요소해석 모델을 작성하고 고유진동수 해석결과를 표 6 에 제시하였다. 표 6 을 보면 X 방향으로 1 차와 2 차 고유진동수가 각각 3.49Hz 와 14.57Hz 로 나타났고, 개방공간이 있는 Y 방향으로는 3.93Hz 와 19.96Hz 로 X 방향보다 약간 높게 나타나고 있다. 이러한 고유진동수는 부가질량 계산에 있어서 앞서의 개방공간이 없는 원통실린더 해석결과 및 단순 계산식 결과와 정확하게 일치하지는 않지만 대체적인 경향은 일치하고 있다. 또한 개방공간에 의해서 회전성분을 갖는 고유진동수는 9.29Hz 에서 발생되는 것으로 나타났고, 수직방향으로는 37.17Hz 로 계산되었지만 이는 해석모델링 과정에서 소듐의 수평방향 부가질량이 수직방향 쪽으로 과대하게 반영된 결과로 실제 고유진동수는 이보다 높을 것으로 판단된다.

표 6. 개방공간을 갖는 상부내부구조물 고유진동수 해석결과 비교 (소듐 포함)

		X-direction		Y-direction		Z-direction	
MODE	FREQUENCY	PARTI. FACTOR	EFF. MASS	PARTI. FACTOR	EFF. MASS	PARTI. FACTOR	EFF. MASS
1	3.49	-121.70	14810.20	-23.65	559.61	0.978	0.95
2	3.93	22.90	524.68	-120.40	14496.60	0.90	0.81
3	9.29	15.54	241.72	2.41	5.84	1.24	1.55
4	14.57	64.96	4220.87	6.63	44.02	-2.13	4.55
5	19.96	-7.40	54.77	73.06	5338.65	8.38	70.32
6	32.81	3.47	12.04	5.47	29.94	-37.08	1374.77
7	34.03	-18.96	359.63	5.51	30.45	-11.91	141.85
8	37.17	-0.80	0.64	-1.06	1.13	105.32	11093.10

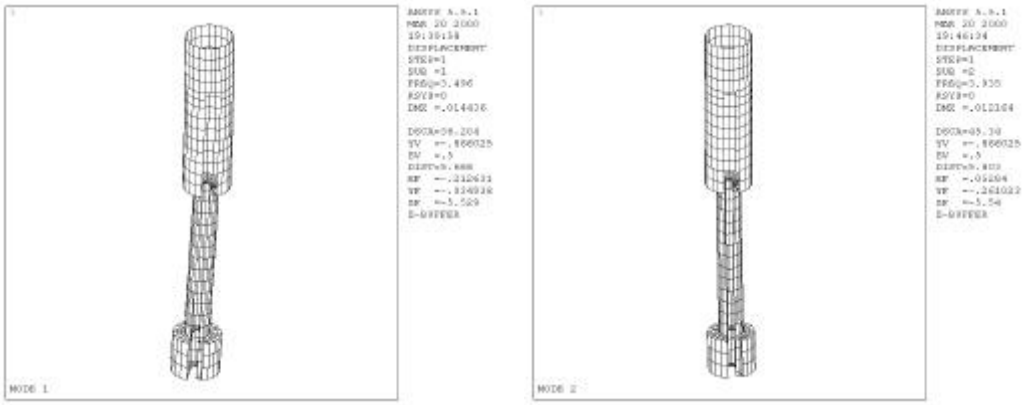


그림 7. 개방공간을 갖는 상부내부구조물의 모드 형상 (소듐포함)

4. 지진가속도 응답스펙트럼해석

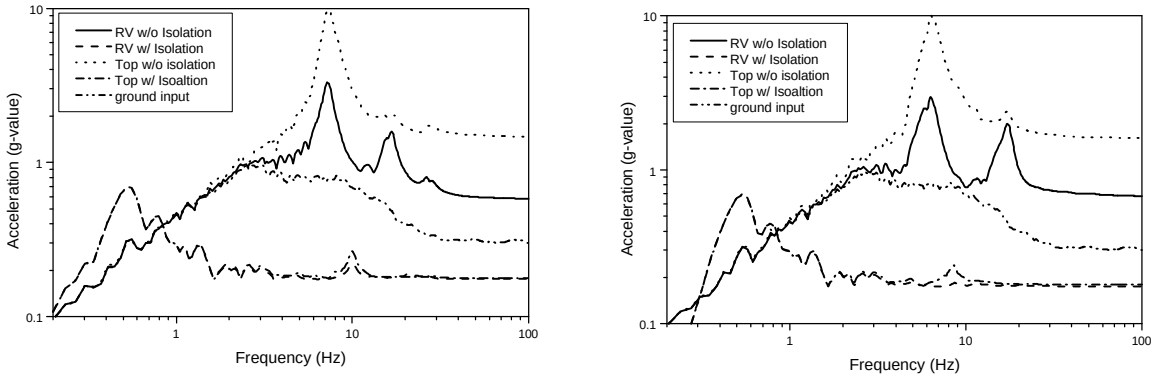
가. 지진가속도 응답스펙트럼 정의

원자로건물에 대한 집중질량과 빔 요소를 이용한 해석모델이 작성되고, 두 종류의 지진이력에 대하여 지진가속도 응답 시간이력해석이 수행된 바 있다[5]. 원자로 상부내부구조물은 원자로헤드

에서 지지 되고, 헤드는 강성이 충분히 강하다고 판단하여 상부내부구조물에 대한 지진하중으로 원자로용기 지지위치의 가속도 응답스펙트럼을 이용하였다.

참고문헌[5]의 지진응답해석결과로부터 0.3g 수평방향과 0.2g 수직방향 인공지진에 의한 가진으로부터 계산된 원자로용기 지지점과 원자로건물 상단에서의 가속도 응답스펙트럼을 그림 8 과 그림 9 에 비면진원자로 건물과 면진원자로 건물에 대하여 나타냈다. 사용된 인공지진은 US NRC 에 규정된 지진응답 스펙트럼 자료로부터 만들어진 가속도 시간이력 자료이다.

X 방향의 경우 원자로용기 지지위치에서 비면진된 경우는 최대 영주기가속도가 0.583g 로, 면진된 경우는 0.173g 로 나타났고, Y 방향의 경우 비면진된 경우는 최대가 0.676g 로, 면진된 경우는 0.175g 로 나타나 면진에 의해서 응답가속도가 크게 감소하였다. 수직방향의 경우 비면진된 경우는 0.362g 로, 면진된 경우는 0.558g 로 면진에 의해 50% 정도 증가되는 것으로 나타났다.



(X 방향) (Y 방향)

그림 8. 원자로건물 수평방향 지진응답 가속도 스펙트럼

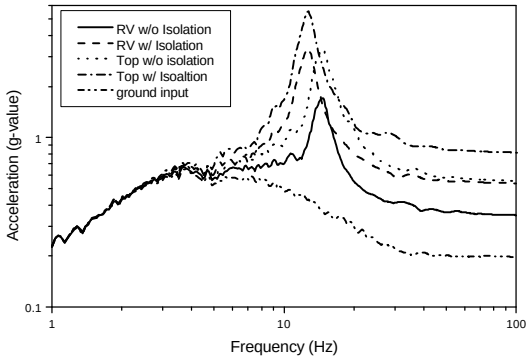


그림 10. 원자로건물 수직방향 지진응답 가속도 스펙트럼

실제 ANSYS 입력자료를 위해 원자로용기 지지점의 통합 가속도 스펙트럼을 작성하였다. 첫째로 수평 X,Y 방향에 대해 비면진원자로 건물의 경우와 면진된 원자로건물에 대하여 각 방향별로 지진응답해석 결과와 이들 두 방향을 동시에 포함하도록 작성된 통합가속도 스펙트럼을 그림 11 과 그림 12 에 나타냈다. 둘째로 수직 Z 방향에 대해서도 수평방향과 같은 방식으로 지진 가속도 응답해석 결과와 이를 포함하도록 작성된 통합 가속도 스펙트럼을 그림 13 에 나타냈다.

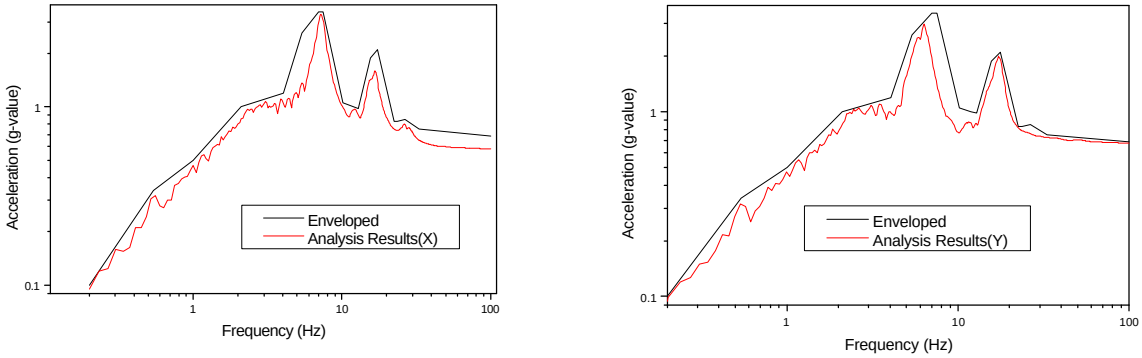


그림 11. 비면진건물의 원자로용기 지지 위치에서의 수평 가속도응답 스펙트럼

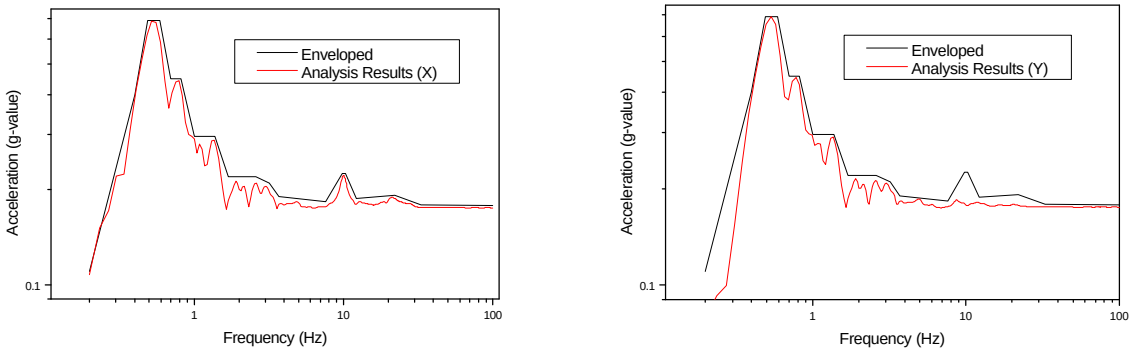
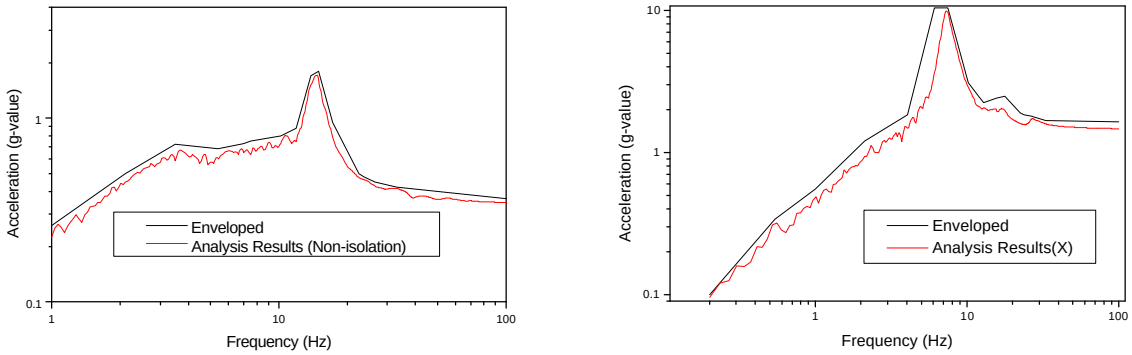


그림 12. 면진 원자로건물의 원자로용기 지지 위치에서의 수평 가속도응답 스펙트럼



(비면진 경우) (면진 경우)

그림 13. 원자로건물 원자로용기 지지 위치에서의 수직 가속도응답 스펙트럼

나. 지진 응답스펙트럼 해석결과

비면진 건물인 경우와 면진된 건물인 경우에 대하여 원자로용기 지지점에서의 통합 지진응답가속도 스펙트럼 하중을 원자로 상부내부구조물에 각각 가하고, 지진응답 변위를 ANSYS 구조해석 프로그램으로 구하였다. 해석에서 고려한 고유진동수 개수는 두 경우 모두 8 개씩으로 수평방향의 경우 고유진동수 유효질량이 전체 무게의 85% 이상을 포함하며, 고려한 최대 고유진동수는 37Hz 이다. 각 방향에 대한 중요 모드와 방향간에는 모두 SRSS 법으로 지진응답을 합산하였다. 수평방향 0.3g 및 수직방향 0.2g 의 안전정지지진(SSE)에 대한 지진응답가속도 해석결과는 다음과 같다.

첫째로, 면진시스템을 채용하지 않은 비면진 건물의 경우, 원자로 상부 내부구조물의 수평 최대 변위가 상부내부구조물 하단에서 4.96cm 가 되었다. 각 방향별로는 X 방향은 4.12cm, Y 방향은 3.13cm, Z 방향은 0.34cm 가 나왔다. 이는 설계에서 수평방향 한계 값으로 설정한 2.5cm 를 초과하는 값으로 수평방향으로 면진시스템이 채택되지 않으면 현재 설계로는 상부내부구조물 수평변위를 만족시킬 수 없는 것을 의미한다. 둘째로, 0.5Hz 고유진동수로 면진된 원자로건물의 경우는 수평 최대변위가 상부내부구조물 하단에서 0.83 cm 가 되었다. 각 방향별로는 X 방향은 0.72cm, Y 방향은 0.52cm, Z 방향은 0.054cm 가 나왔다. 수평방향 최대변위 0.83cm 는 설계 한계값 2.5cm 와 비교하여 충분히 작은 값이다. 수직방향에 대한 구체적 변위 제한값이 설정되지는 않았지만 해석 모델 작성에 반영된 수직방향 질량계산에서의 보수적인 가정 등을 고려할 때 현재의 수직방향 최대 응답변위 0.054cm 는 원자로 제어시스템에 영향을 주지않을 만큼 충분히 작은 것으로 판단된다.

5. 결론 및 검토내용

액체금속로 원자로 상부내부구조물의 구조적 측면에 대한 개념설계정립을 위해 상부내부구조물에 대한 3차원 입체모델링과 ANSYS 프로그램을 이용한 고유진동수 해석을 수행하였다.

IDEAS로 작성한 상부내부구조물의 3차원 입체모델로부터 계산한 상부내부구조물의 전체 무게는 13.1톤이 되었다. 소듐에 대부분이 잠겨 있는 상부내부구조물의 고유진동수는 소듐에 의한 유체-구조물 상호작용을 반영하기 위한 모델링에서 3차원 유체요소와 부가질량을 이용한 모델이 각각 작성되었으며, 수정된 부가질량 모델은 3차원 유체요소를 이용한 결과와 잘 일치하였다.

상부내부구조물에 개방공간이 없는 경우 상부내부구조물 1차 고유진동수는 3.76Hz로 나타났고, 원통 실린더 한쪽에 개방공간이 있는 상부내부구조물의 1차 고유진동수는 3.49Hz로 나타나 개방공간에 의해서 구조물 고유진동수가 15% 정도 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 이들 값은 면진주파수 0.5Hz와 떨어져 있어 지진하중에 대해 구조적 측면에서 건전함을 예측할 수 있었다.

원자로 지지점에서의 지진응답스펙트럼을 입력 하중으로 지진응답특성을 해석한 결과 원자로 건물이 수평 면진된 조건에서는 설계 제한값 2.5cm 보다 작은 0.83cm의 수평변위가 발생하여, 비면진된 경우의 4.96cm와 비교할 경우 면진설계가 비면진설계보다 구조적 건전성 측면에서 유리함을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module(PRISM Liquid-Metal Reactor), NUREG-1368, U.S. Nuclear Regulatory Commission,1994.
2. 박창규 등, KALIMER Design Concept Report, 한국원자력연구소, KAERI/TR-888/97, 1997.
3. IDEAS 6.0,Master Modeler, 1999.
4. ANSYS 5.5 범용구조해석 프로그램, 1999.
5. 유봉, 이재한, 최인길, KALIMER 원자로건물 지진해석 모델링 및 지진응답해석, 한국원자력연구

소, KAERI/TR-1062/98, 1998.
6. S.S Chen, and Ho Chung, Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass, ANL-CT-76-45, 1976.
7. S.S. Chen, and Ho Chung, Added Mass and Damping of A Vibration Rod in Confined Viscous Fluids, ANL-CT-75-08, 1976.