2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 상부내부구조물 지진해석용 단순 보모델 개발 및 지진시간이력 응답해석

A Simple Beam Model Development and Seismic Time History Response Analysis of Upper Internal Structure of KALIMER Liquid Metal Reactor

이재한, 구경회
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 KALIMER 상부내부구조물의 지진시간이력가속도해석을 위해 단순 보모델을 개발하였다. 단순 보모델에 대한 동특성 해석결과는 단순 보모델이 기존 상세 해석모델의 동특성을 잘 표현하고 있다. 단순모델을 이용한 지진시간이력가속도해석을 수행하였으며, 상세모델의 지진응답스펙트럼 해석결과와 비교하였다. 지진해석결과는 0.3g 안전정지 설계지진하중에 대하여 0.5Hz 수평면진 원자로건물 조건에서 최대 수평지진응답변위가 최대 0.7cm 로 나타났다.

Abstract

A simple beam model to perform time history acceleration response analysis for the upper internal structure (UIS) of KALIMER is developed based on the analysis results of a detail solid model having a large d.o.f. The simple model well represents the characteristics of the detail solid model. A seismic time history acceleration response analysis are performed and compared with the response spectrum results of the detailed model. For SSE of 0.3g in horizontal direction for a reactor building seismically isolated with 0.5Hz, the maximum horizontal displacement at UIS bottom is calculated by 0.7cm.

1. 서론

액체금속로 원자로구조물은 그림 1 과 같으며, 원자로구조물에서 원자로헤드 내에 있는 회전프러그에 부착된 상부내부구조물(Upper Internal Structure, UIS)의 주요 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 11.2m 이고, 상부 직경이 140cm 인 2 단 원통실린더 형태이며, 상단이 원자로헤드에서 지지 되는 단순 외팔보 형태로 굽힘운동이 가능하다[1]. 상부내부구조물은 상단으로부터 1.5m 부터 하단까지 고온 소듐에 잠겨있으며, 한쪽이 개방된 원통형 구조로 노내 핵연료교환기가 노심 핵연료집합체에 접근할 수 있도록 한다.

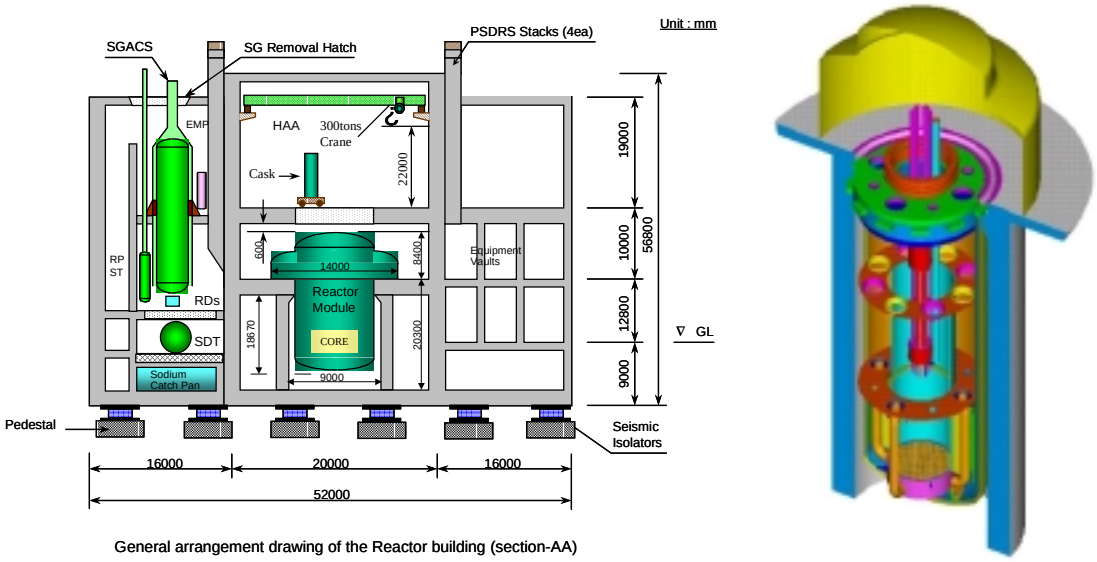


그림 1. KALIMER 건물 및 원자로구조물 개념도

상부내부구조물 설계에서는 상부내부구조물의 고유진동수가 원자로건물에 수평방향 면진주파수에 근접하는 것을 피해야 하며, 구조물은 유동기인진동에도 구조건전성을 유지해야 한다. 상부내부구조물의 중요한 기능은 지진하중에 의한 수평변위가 일정 값 범위에 존재하여 어떤 경우에도 제어봉의 삽입/인출이 가능하여 노심제어기능을 잃지 않도록 하는 것이다.

상부내부구조물의 수평변위를 좀더 정확하게 계산하기 위해서는 지진시간이력가속도해석이 필요하다. 해석모델로는 계산시간의 제약에 의해서 자유도가 적으면서 실제 상부내부구조물 동적특성을 잘 나타내는 단순 보모델을 이용한다. 측면 개방공간이 있는 상부내부구조물에 대한 정확한 동적해석은 부가질량 모델링 방법과 쉘요소로 이루어진 상세 해석모델을 이용하여 계산하였으며[2], 본 논문에서는 시간이력해석을 위해 그 결과를 이용하여 집중질량과 보요소로 이루어진 단순 보모델을 작성하였다.

단순모델의 지진해석에 이용한 하중은 0.3g 안전정지 설계지진하중에 대하여 0.5Hz 수평면진 원자로건물 조건에서 원자로지지점 위치의 지진응답시간이력이다. 지진응답시간이력해석결과는 상세모델의 지진응답스펙트럼 해석결과와 비교하였다 또한 수평 변위한계 및 구조적 건전성을 검토하였다.

2. 상부내부구조물 치수

KALIMER 원자로 상부내부구조물의 3 차원 입체모델에 사용된 주요치수는 다음과 같다[2].

상부원통 외부직경 = 140cm, 두께 = 2.5cm, 길이(상부) = 560cm
중간원통 외부직경 = 74cm, 두께 = 5.0cm, 전체길이 = 468cm
하부원통 외부직경 = 140cm, 두께 = 2.5cm, 길이(하부) = 92cm
중간연결평판 두께 = 10cm
하부원통 상/하평판 두께 = 2.5cm

그림 2 에는 상부내부구조물 길이 방향을 따라 직경이 다른 두개의 외부 실린더 원통이 6 개의 제어봉 보호관, 3 개의 중성자 계측대 보호관을 지지 하고있다. 그림 오른쪽으로 하단부 바깥쪽 실린더와 이의 단면이 나타나 있다. 원통실린더에는 노내 핵연료교환기 수용 열림 공간(open slot)과 노내 핵연료교환기에 대한 하단지지대가 하부 원통실린더 끝면에서 돌출되어 있다. 개방공간의 폭은 25cm 이고 개방공간이 시작되는 위치는 상단으로부터 1.5m 하단이다. 중간원통 실린더 중간 높이에는 제어봉구동축과 열전대 보호관을 잡아주는 2.5cm 삼각평판이 위치하고 있다.

각 부품의 무게는 외부 실린더 무게가 9.7 톤이고, 하부 원통실린더는 1.17 톤, 제어봉구동축 보호관 등이 1.32 톤 등으로 전체무게는 11.19 톤으로 계산되었다.

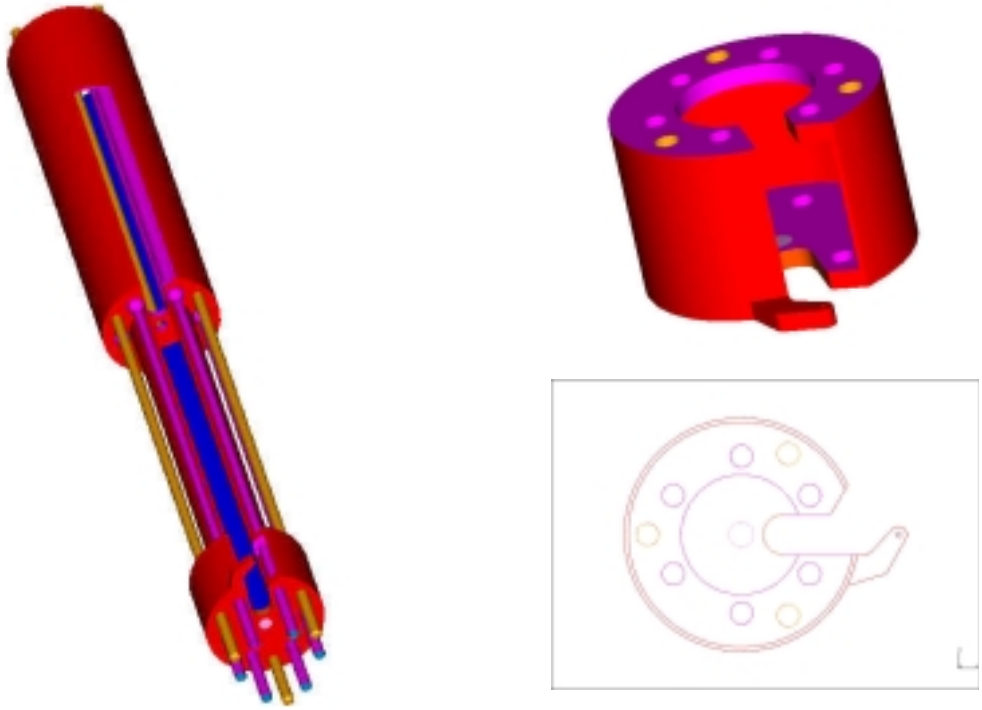


그림 2. 상부내부구조물 3 차원 입체모델

3. 상부내부구조물 동특성해석

원자로 상부내부구조물의 구조 동특성 해석을 위해 ANSYS 범용구조해석 프로그램[4]으로 모델링하였다. 유한요소모델에 사용된 요소는 shell 63 요소와 mass21 요소이다. 해석에 사용된 상부내부구조물의 재료인 316 스테인리스강과 소듐의 재료 물성치는 표 1 과 같다.

표 1. 스테인리스강과 소듐의 재료 물성치

스테인리스강 (상온)		액체 소듐	
탄성계수	195 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

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[5,6]. 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 5.6m 중에 3.6m 만 소듐에 잠겨 있는 것으로 이를 고려하면 내/외부 소듐에 의해 전체 구조물의 밀도는 100% 이상 증가된다.

표 2. 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 = $\rho_{sodium}\ \pi$ /4*$(0.74)^2$ =365Kg/m, M2 = $\rho_{sodium}\ \pi$ /4*$(1.40)^2$ = 1308.5Kg/m Cm =(1+((d/D)^2)/(1-(d/D)^2)			

상부내부구조물의 한 쪽에 노내핵연료교환기(IVTM) 접근이 가능한 개방공간에 의하여 해석모델은 약간 복잡해 진다. 개방공간은 그림 3 에 나타나 있는 바와 같이 원자로헤드로부터 1.5m 아래에서부터 상부내부구조물 하부 끝 단까지 폭과 깊이가 25cm x 50cm 인 공간이 형성되어 있다. 유체요소를 표 2 에 따라 부가질량으로 고려한 유한요소해석 모델을 작성하고 고유진동수 해석을 수행한 해석결과는 표 3 과 X,Y 방향 1 차 고유진동수는 그림 4 에 제시하였다. 표 3 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. 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.

그림 3. 유한요소해석모델

표 3. 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

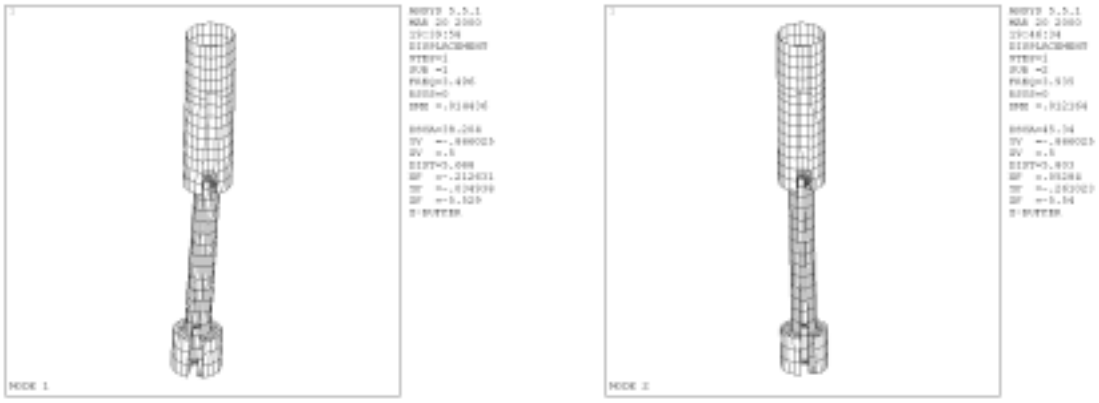


그림 4. 개방공간을 갖는 상부내부구조물의 모드 형상 (소듐포함)

4. 상부내부구조물 단순 보 모델링

상세 해석모델은 많은 절점을 갖고있어 자유도가 매우 크기 때문에 지진시간이력해석에 사용하기 어렵다. 이로부터 지진이력가속도에 대한 시간이력응답해석을 수행할 수 있는 단순 모델의 개발이 요구된다.

단순 보 모델은 상부내부구조물의 고유진동수와 모드형상 등 동특성 특징을 유지하는 범위에서 상기 해석결과의 고유진동수 중에서 지진하중에 크게 영향을 주는 1 차와 2 차 고유진동수를 가지고 있도록 작성하였다. 사용된 절점 수는 8 개이고 요소 수는 7 개를 사용하였다. 반복해석을 통하여 작성하여 정립한 모델은 그림 5 와 같고, 보 및 집중질량에 대한 모델의 수치자료는 표 4 및 표 5 와 같다.

표 4 상부내부구조물 단순모델의 절점 정보

Nodes	Coordinate(Z)	Added Mass(X, Y)	Added Mass(Z)
1	0.0		
2	-1.5		
3	-3.0	2733.7	
4	-5.0	3397.5	3761.0
5	-5.5	2568.0	
6	-7.5	1586.7	
7	-9.68	3374.4	7266.4
8	-10.6	2546.9	2348.4

표 5 상부내부구조물 단순모델의 보요소 정보

Elements	Nodes	Area(m^2)	I_{xx}(m^4)	I_{yy}(m^4)	Young Modulus
1	1-2	0.108	0.020424	0.020424	165 Gpa (500°C)
2	2-3	0.108	0.015318	0.01072	
3	3-4	0.108	0.015318	0.01072	
4	4-5	0.1084	0.001945	0.001362	
5	5-6	0.1084	0.002918	0.002010	
6	6-7	0.1084	0.002918	0.002010	
7	7-8	0.2164	0.022410	0.016007	

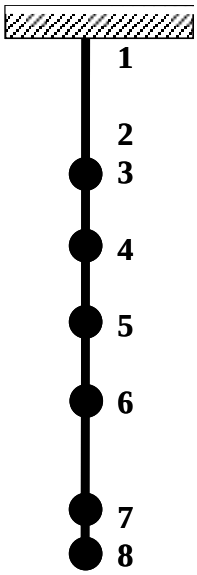


그림 5. 단순 보모델

8 절점 단순모델에 대한 해석결과는 표 6 및 그림 6 과 같으며 3 차원 유한요소모델 해석결과와 비교한 결과 고유진동수 최대 편차가 x 방향 2 차 고유진동수에서 13%로 나타나 편차가 존재하지만 다른 모우드의 경우 참여계수를 포함하여 전체적으로 상당히 근접한 고유진동수 특성을 나타내고 있다.

표 6. 상부내부구조물 단순 모델의 고유진동수 해석결과

		X-direction		Y-direction		Z-direction	
MODE	FREQUENCY	PARTI. FACTOR	EFF. MASS	PARTI. FACTOR	EFF. MASS	PARTI. FACTOR	EFF. MASS
1	3.45	121.55	14775.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3.99	0.0	0.0	123.55	15265.7	0.0	0.0
3	16.5	87.188	7601.81	0.0	0.0	0.0	0.0
4	18.63	0.0	0.0	85.895	7377.99	0.0	0.0
5	49.7	-31.034	963.098	0.0	0.0	0.0	0.0
6	58.54	0.0	0.0	29.921	895.256	0.0	0.0
7	61.44	0.0	0.0	0.0	0.0	143.13	20486.8
8	66.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

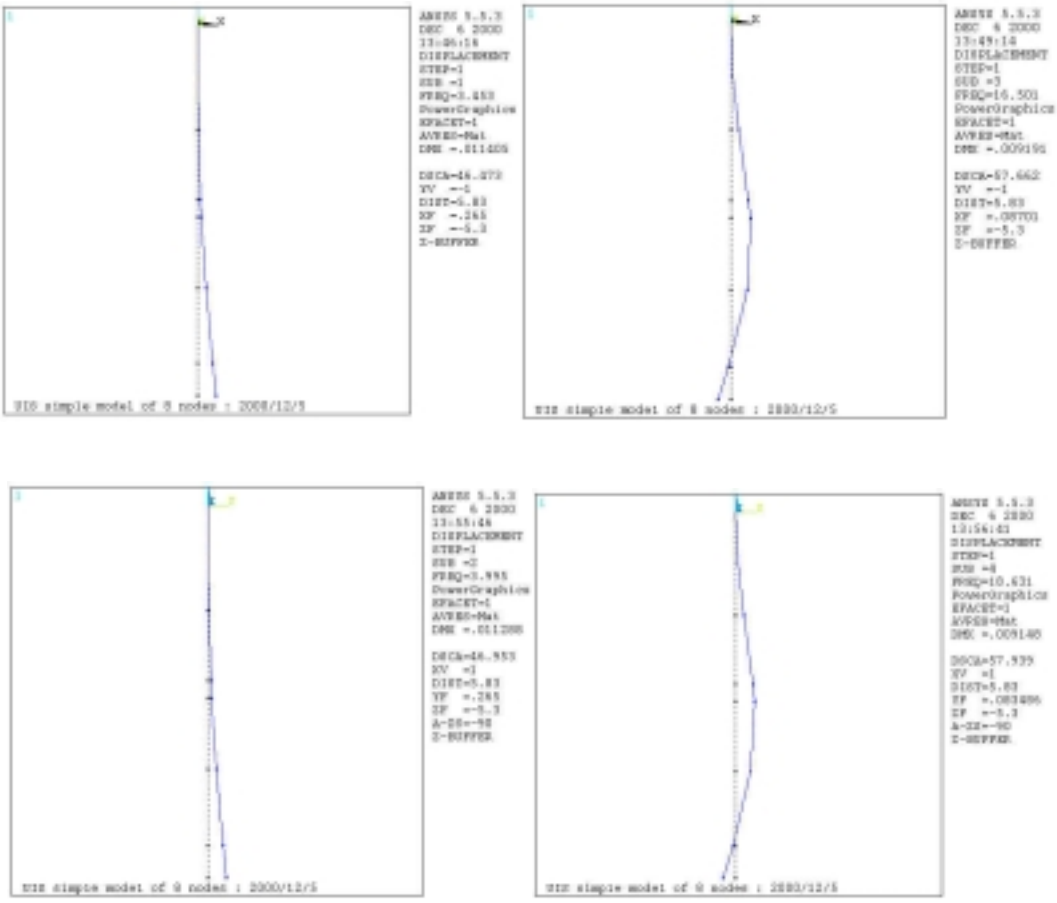


그림 6. 단순 보모델의 수평방향 1,2 차 모드형상

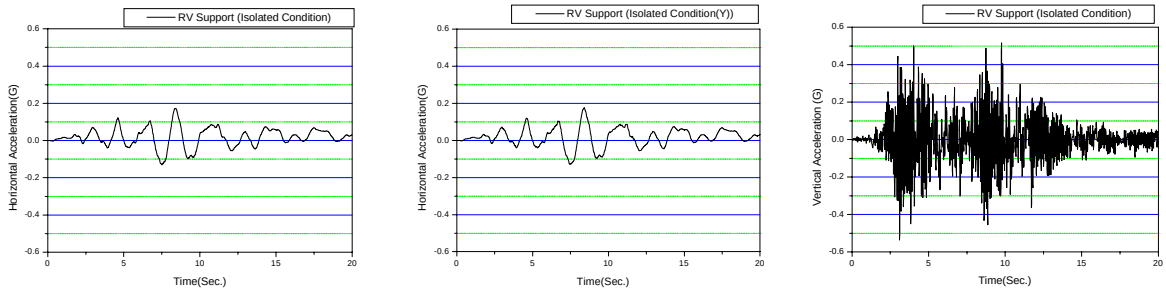
5. 지진가속도 시간이력응답해석

가. 지진가속도 입력하중

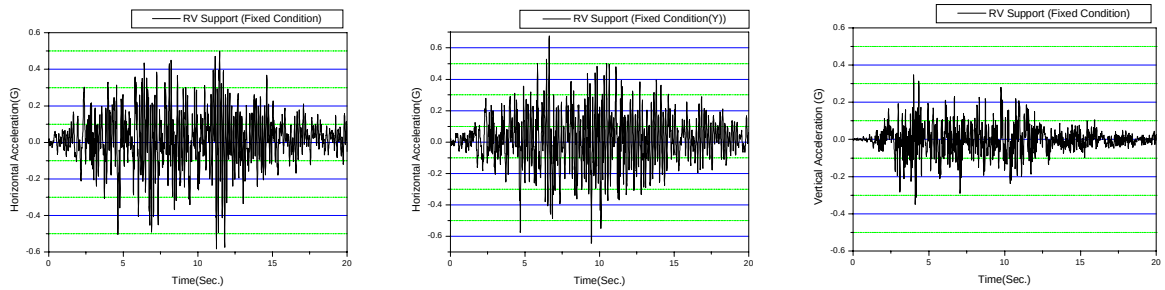
원자로건물에 대한 집중질량과 보요소를 이용한 건물해석모델이 작성되고, 두 종류의 지진이력에 대하여 지진가속도 응답 시간이력해석이 수행된 바 있다[7]. 원자로 상부내부구조물은 원자로헤드 중심에 위치하는 회전플러그에서 지지 되고, 헤드는 강성이 충분히 강하다고 판단하여 상부내부구조물에 작용하는 지진하중으로 원자로용기 지지위치의 가속도 시간이력을 이용하였다.

참고문헌[7]의 지진응답해석결과로부터 0.3g 수평방향과 0.2g 수직방향 인공지진에 의한 가진으로부터 계산된 원자로용기 지지점에서의 가속도 지진시간이력결과를 그림 7 에 면진원자로 건물과 비면진원자로 건물에 대하여 나타냈다. 사용된 입력인공지진은 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.



(면진 원자로건물 경우)



(비면진 원자로건물 경우)

그림 7. 원자로용기 지지위치에서의 지진입력가속도 시간이력

나. 지진가속도 시간이력 해석결과

비면진 건물인 경우와 면진된 건물인 경우에 대하여 원자로용기 지지점에서의 지진응답가속도 시간이력하중을 원자로 상부내부구조물에 각각 가하고, 지진응답 변위 및 가속도를 ABAQUS 구조해석 프로그램[8]으로 구하였다.

수평방향 0.3g 및 수직방향 0.2g 의 안전정지지진(SSE)에 대한 시간이력 지진응답변위 해석결과는 통합스펙트럼을 이용한 지진응답변위 해석결과와 합계 표 7 에 나타냈다.

표 7. Maximum Displacement of UIS Bottom for SSE Seismic Load (ATH)

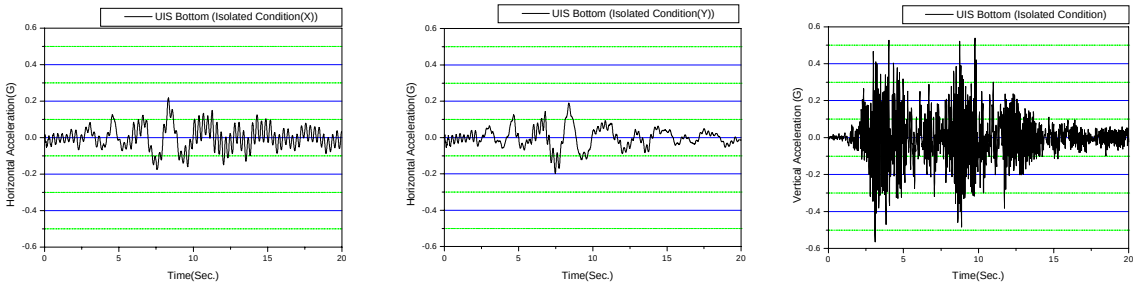
Analysis Method	Isolation (Cm)			Non-Isolation (Cm)		
	X-Dir.	Y-Dir.	Vertical	X-Dir.	Y-Dir.	Vertical
Enveloped Response Spectrum (ANSYS)	0.72	0.52	0.054	4.12	3.13	0.34
Time History (ABAQUS)	0.567	0.41	0.0044	5.62	3.60	0.003

비면진 원자로건물의 경우 수평 최대변위가 상부내부구조물 하단에서 6.67 cm 가 되었다. 각 방향별로는 X 방향은 5.62cm, Y 방향은 3.60cm, Z 방향은 0.03mm 가 나왔다. 수평방향 최대변위 6.67cm 는 설계 한계값 2.5cm 와 비교하여 매우 큰 값이다.

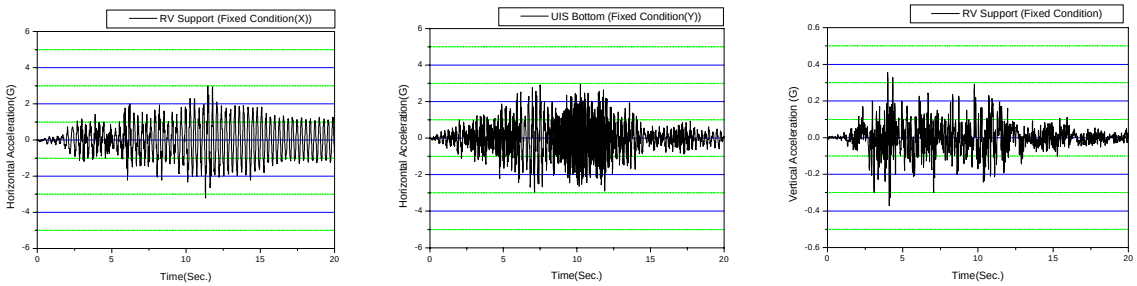
0.5Hz 고유진동수로 면진된 원자로건물의 경우는 수평 최대변위가 상부내부구조물 하단에서

0.70 cm 가 되었다. 각 방향별로는 X 방향은 0.578cm, Y 방향은 0.41cm, Z 방향은 0.044mm 가 나왔다. 상부내부구조물 하단의 수평방향 최대변위 0.70cm 는 노심상단과 상부내부구조물 하단의 상대변위 한계값으로 고려하는 2.5cm 와 비교하여 충분히 작은 값이다.

수직방향에 대한 구체적 변위 제한값이 설정되지는 않았지만 해석모델 작성에 반영된 수직방향 질량계산에서의 보수적인 가정 등을 고려할 때 현재의 수직방향 최대 응답변위 0.044mm 는 원자로 제어시스템에 영향을 주지않을 만큼 충분히 작은 것으로 판단된다. 그러나 이 값은 표 7 의 3 차원 상세모델에 대한 ANSYS 지진응답스펙트럼 해석결과, 0.54mm 와 비교할 때 매우 작은 값이다. 원인으로는 시간이력해석 모델에서 직경이 다른 실린더 연결부에 대한 모델링의 문제점으로 판단되며, 추후 개선이 필요하다.



(면진 원자로건물 경우)



(비면진 원자로건물 경우)

그림 8. 상부내부구조물 하단위치에서의 지진응답가속도 시간이력

수평방향 0.3g 및 수직방향 0.2g 의 안전정지지진(SSE)에 대한 지진응답가속도 해석결과는 그림 8 에 나타났다. 해석결과를 보면 면진된 경우에 최대 수평방향가속도가 0.22g 로 입력가속도에 비하여 증폭이 크지 않은 것으로 나타났으며, 비면진 경우는 수평방향으로 3.2g 가 발생되어 크게 증폭된 것을 알 수 있다.

시간이력가속도해석과 응답가속도 스펙트럼 해석결과를 비교할 때 면진 경우에는 지진응답스펙트럼 해석결과가 보수성을 갖고 있는 것으로 나타났지만, 비면진 경우는 시간이력해석결과가 덜 보수적인 것으로 나타나 이에 대한 검토가 요구된다.

6. 결론 및 검토내용

액체금속로 원자로 상부내부구조물의 구조적 측면에 대한 개념설계정립을 위해 상부내부구조

물에 대한 단순모델을 개발하고, 고유진동수 해석을 수행하였다.

원자로 지지점에서의 지진응답가속도시간이력을 입력 하중으로 지진응답특성을 해석한 결과 원자로건물이 수평 면진된 조건에서는 0.7cm의 수평변위가 발생하여 노심상단과 상부내부구조물 하단의 상대변위 한계값으로 고려하는 2.5cm와 비교할 때 작은 값이다.

수직방향에 대한 시간이력해석결과에서 최대변위는 0.044mm로 나타나 ANSYS 지진응답스펙트럼 해석보다 매우 작아 단순모델의 보완이 필요한 것으로 나타났다.

면진된 경우와 비면진된 경우를 비교한 결과 면진설계가 비면진설계보다 구조적 건전성 측면에서 유리한 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 한도희 등, KALIMER Preliminary Conceptual Design Report, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1636/2000, 2000.
2. 이재한, 유 봉, "액체금속로 상부내부구조물 구조동특성 및 지진응답해석," KAERI/TR-1538/2000, 2000.
3. 이재한, 유 봉, "액체금속로 KALIMER 상부내부구조물 구조 동특성 및 지진응답해석," 2000 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회,2000.
4. ANSYS 5.5 범용구조해석 프로그램, 1999.
5. S.S Chen, and Ho Chung, Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass, ANL-CT-76-45, 1976.
6. S.S. Chen, and Ho Chung, Added Mass and Damping of A Vibration Rod in Confined Viscous Fluids, ANL CT-75-08, 1976.
7. 유봉, 이재한, 최인길, KALIMER 원자로건물 지진해석 모델링 및 지진응답해석, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1062/98, 1998.
8. ABAQUS 5.8 범용구조해석 프로그램, 2000.