액체금속로 면진 시험구조물의 해석모델링 개발 및 지진응답비교

Development of Analysis Model and Comparison of Seismic Analysis Responses with Test Results for an Isolated Test Structure for Liquid Metal Reactor

유 봉* 이 재 한* 구 경 회**

Yoo, Bong Lee, Jae-Han Koo, Gyeong-Hoi

ABSTRACT

The initial analysis frequencies of the isolated test structure for seismic excitation tests give quite higher values to the actual modal test results. This large difference was resulted from some uncertainties in analysis modeling of several connection regions between column and upper beam, cross bars of the isolated structure. A modified simple analysis model is developed representing the actual dynamic behaviors of the test model, and the seismic analysis responses of the simple model are compared with those of the seismic tests.

1. 서 론

액체금속로 면진 시험구조물의 지진응답시험은 1998 년과 1999 년 2 차례 수행되었다. 1 차에서는 1/8 축소규모 고감쇠 면진베어링에 대한 시험구조물의 여러조건과 El Centro 1940 NS, Mexico 1985, 인공지진 등 여러 지진하중에 대하여 가진응답시험을 수행하고 결과를 분석하였다[1,2,3]. 2 차 시험에서는 1 차에서 발생한 문제점을 보완하고 납삽입형 면진베어링과 3 차원 면진베어링에 대한 가진시험을 수행하였다. 시험목적은 액체금속로 시험구조물의 지진응답특성을 찾고, 응답을 예측하는 해석방법을 검증하는데 있었으며, 이러한 가진시험으로부터 많은 시험자료를 생산하였다.

시험구조물에 대한 초기 설계해석모델을 이용한 동특성 해석결과에서 시험구조물이 갖는 1 차 고유진동수가 16 Hz 로 계산되었다[4]. 그러나 실제 제작된 시험구조물에 대한 시험에서 1 차 고유진동수가 6Hz 정도로 나타나 설계 목표치 16Hz 에 비하여 매우 낮았으며, 2 차 시험을 위한 시험구조물의 강성보강작업에 의하여 10Hz 정도로 증가하였다. 면진 시험구조물의 지진응답 해석방법을 검증하는데 무엇보다도 시험결과를 잘 표현하는 해석모델의 개발이 필수적이나 초기에 사용한 해석모델이 시험 결과를 잘 표현하지 못하고 있다. 초기 해석모델의 고유진동수와 시험결과 사이에 많은 차이가 발생한 것에 대한 원인 규명을 하기 위하여 면진 시험구조물에서 불확실성을 포함하는 모든 연결부에 대한 여러가지 연결강성의 변경을 통한 많은 고유치해석을 수행하고 상세해석모델에 시험구조물의 불확실성을 반영하였다[4].

* 한국원자력연구소, 책임연구원, 정회원

** 한국원자력연구소, 선임연구원

본 논문에서는 첫째로 상세해석모델을 근거로 지진시간이력해석을 수행할 수 있는 적은 절점을 갖는 단순 보모델을 개발하고 이의 동특성을 상세해석모델로 검증하였다. 둘째로 개발된 단순 보모델에 대하여 납삽입형 저감쇠 면진베어링의 전단시험결과로부터 계산한 면진베어링 전단강성을 도입하고, 시험에 사용한 대표적인 가속도 시간이력하중을 입력으로 하여 시험구조물의 지진응답해석을 수행하고 이를 지진응답 시험결과와 비교하였다.

2. 시험구조물 동특성해석

면진 시험구조물은 그림 1에 나타난 바와같이 하부슬라브, 상부슬라브, 상부슬라브 지지구조물로 구성된다. 하부슬라브는 RC 콘크리트 재료로 무게가 15.5톤이고, 두께가 30cm, 면적이 4.26 x 4.26m^2이다. 상부슬라브(RC 콘크리트)는 무게가 5.67톤이고, 두께가 33cm, 면적이 2.74 x 2.74m^2이다. 상부슬라브 지지구조물은 4개의 기둥, 4개의 수평보 및 조임형 대각봉으로 구성되며, 상부슬라브의 위치를 높게 또는 낮게 조정이 가능하도록 할 수 있다. 시험구조물에 장착된 면진베어링은 0.5Hz로 면진되는 액체금속로에 사용되는 면진베어링의 1/8 축소규모이며, 액체금속로와 상사성을 위해 목표면진주기는 1.41Hz이다.

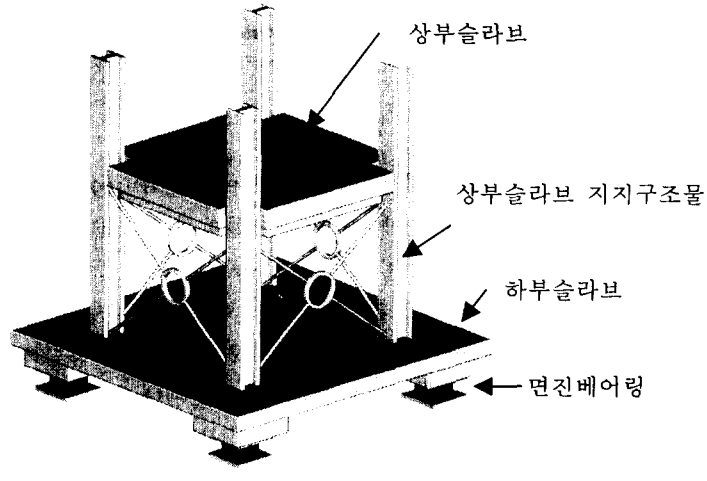

그림 1. 면진 시험구조물 개념도

2.1 면진베어링 및 시험구조물 모델링

면진 시험구조물에 사용한 면진베어링은 한국원자력연구소에서 설계하고 유니슨산업에서 제작한 납삽입용 면진베어링에 사용되는 고무재료로 제작된 저감쇠 고무 면진베어링으로 이들의 성능시험은 한국과학기술원의 2 축 전단시험기를 이용하여 수행되었다[5]. 시험구조물에 장착된 면진베어링의 성능시험결과는 표 1 및 그림 2 와 같다. 0.5Hz 시험속도의 경우 100% 전단변형률 기준으로 면진베어링의 수평강성은 495.6Kg_f/cm 이고, 전단변형률이 50% 일 때 면진베어링의 수평강성은

567.2 Kg_f/cm 이다. 등가감쇠값은 50%에서 100% 전단변형률 일 때 2% 근처로 나타났다. 해석모델에서는 등가강성은 선형 스프링요소로 등가감쇠는 점성감쇠(Viscous Damping)로 모델링하였다.

표 1. 축소규모(1/8) 저감쇠 면진베어링 성능특성시험

시험 주파수	전단변형률 (%)	등가강성 (Kgf/cm)	등가감쇠 (Eq. Damping, %)	전단변위 (mm) (max/min)
0.05Hz	25	740.6	5.504	8.742/-8.730
	50	615.5	4.984	17.48/-17.50
	100	547.0	4.847	34.98/-34.98
	150	604.9	4.807	52.43/-52.42
0.5Hz	25	675.2	2.671	8.717/-8.701
	50	567.2	2.013	17.41/-17.46
	100	495.6	1.861	34.85/-34.84
	150	589.9	1.882	52.34/-52.38

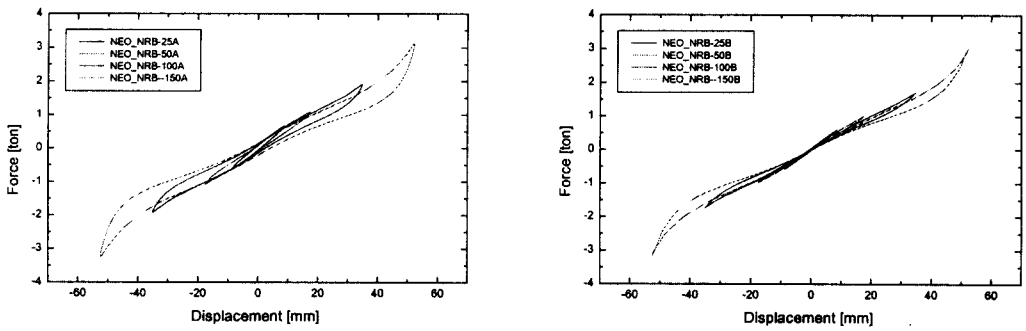

그림 2. 전단변위에 따른 면진베어링 전단이력곡선(0.05Hz,0.5Hz)

시험구조물에서 많은 불확실성을 내포한 연결부위 중에서 하부슬라브와 기둥사이(Joint1)의 회전강성은 $1.79x10^6(Kg_f$ cm/radian)으로 수평보과 기둥사이(Joint2)는 연결보(Beam5)를 도입하고, 직경이 2.54cm 인 대각봉(Cross-bar)이 연결되는 끝단 조건으로 연결보(Beam4)와 핀연결을 사용하는 것이 실제 실험결과와 가까운 조건을 얻었다. 이 경우에 면진베어링의 50%, 100% 전단변형기준에서 면진베어링의 수평강성 값을 해석모델에 반영하였다. 그림 3 에 나타낸 해석모델에 사용된 전체 요소수는 240 개, 절점수는 169 개이다.

2.2 시험구조물의 고유진동수 특성

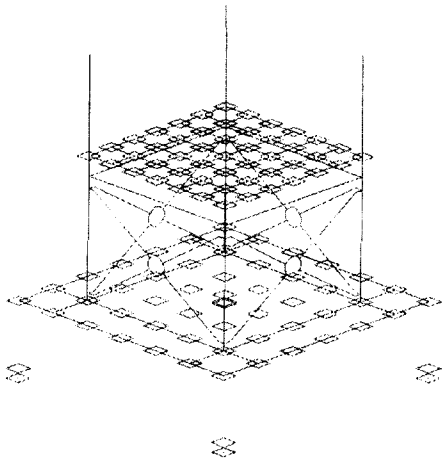

그림 3. 면진 시험구조물 상세해석모델

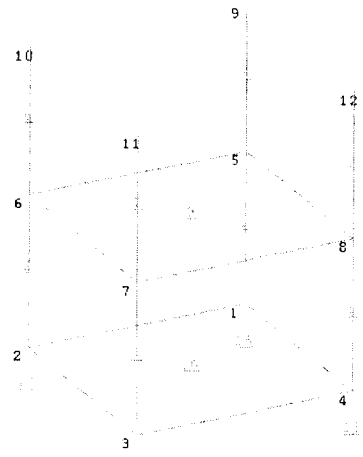

그림 4. 면진 시험구조물 단순 보모델

면진 시험구조물에서 면진베어링의 전단변형이 50%와 100% 인 두 경우에 대하여 고유진동수 특성을 ABAQUS 프로그램으로 계산한 값을 표 2 에 나타냈다. 표 2 에서 보는 바와 같이 면진베어링의 수평변형이 50%에서 100%가 되면 면진주파수도 1.61Hz 에서 1.51 Hz 로 작아지고 있다. 주파수 특성을 보면 면진주파수에 유효질량이 모두 집중되어 있으며, 구조물 고유진동수의 유효질량은 상대적으로 매우 작게 나타나며, 면진주파수가 1.61Hz 에서 1.51 Hz 로 바뀌어도 크게 변하지 않았다.

표 2. 면진 시험구조물의 동특성 해석결과 (Cross-bar Diameter =2.54cm)

	50% 전단변형			100% 전단변형		
Mode No.	Frequency (Hz)	Effective Mass (kg)	Participation Factor	Frequency (Hz)	Effective Mass (kg)	Participation Factor
Isolation (X,Y)	1.61	21,613	1.05	1.51	21,613	1.05
Isolation (Z-Rot)	3.41			3.20		
1st (X1)	**10.9**	3.86	0.065	**10.9**	2.98	0.058
2nd (Y1)	**11.3**	3.47	0.050	**11.3**	2.69	0.044
3-th(Z-rot1)	**15.8**	-	-	**15.7**	-	-
4-th Vert. (Z1)	**19.1**	8,597	1.267	**18.9**	8,593	1.267
5-th(X2)	**25.1**	0.010	0.0076	**25.0**	0.008	0.0067
Cross-bar	**9.85**	0.035	0.034	**9.85**	0.028	0.028
Joint1 : 10^7(lb_f in/radian), Joint2 : Connection Beam 5, Cross-bar ends : Pinned+4" (Beam4)						

3. 지진응답해석을 위한 단순 보모델

지진응답 시간이력해석을 위해 상세해석모델의 주요한 고유진동수 특성을 유지하면서 계산시간의 단축을 위해 절점을 줄이는 작업을 통하여 전체 절점 수가 16 개이고, 요소 수가 14 개로 이루어진 단순 보모델을 그림 4 와 같이 작성하였으며, 각 요소 부재의 치수와 재료강성은 전체시스템 특성에 맞게 조절하였다. ABAQUS 프로그램으로 고유진동수를 해석한 결과를 표 3 에 나타냈다. 고유진동수 특성을 상세해석모델과 비교하면 100% 전단변형의 경우 Y 방향의 고유진동수가 11.3Hz 와 11.48Hz 로 비교적 정확하게 표현된 것을 알 수 있다.

표 3. 단순 보모델의 고유진동수 해석결과

Non-isolation		Isolation			
MODE	Frequency (Hz)	MODE	Frequency (Hz)	Effective Mass (kg)	Participation Factor
		Isolation (X,Y)	1.49	22,317	1.018
		Isolation (Z-rot)	7.25		
X1	9.43	X1	11.06	2.70	0.186
Y1	9.54	Y1	11.48	2.26	0.195
Z-rot	13.69	Z-rot	29.50		
X2	24.05	X2	28.77	0.12	0.0007
NOTE) 0.5Hz, 100% 전단변형 의 경우임					

4. 단순 보모델에 대한 지진응답해석

16 절점으로 구성된 단순모델에 시험에 사용된 지진하중을 가진하는 경우에 대하여 지진응답 시간이력해석을 수행하였다. 시험구조물에 적용한 동일한 입력가진을 사용하기 위하여 여러 시험 중에서 그림 5 에 나타난 시간-가속도 이력을 Y 방향 입력가진으로 하였다. 시험에 사용한 Y-방향 가진지진은 설계를 위한 인공지진으로 최대가속도 0.3g 를 목표로 하였지만 가진대 위에서 측정된 최대 가속도는 0.41g 를 기록하고 있다. 시험에서 측정한 상부 및 하부슬라브에서의 응답가속도는 시간이력은 그림 6 과 같고, 이들의 응답가속도 스펙트럼은 그림 7 에 나타냈다.

단순 보모델에 대한 가진시간이력해석은 0.00707 초의 분해능(resolution)으로 15 초 동안 수행하였다. 해석에서 구조물의 구조감쇠는 주요 구조물 진동수에서 2%가 되도록 하였다. 그림 8 에는 상하부슬라브에서의 가속도 시간이력을 나타냈으며, 가속도 성분을 보면 면진주기가 전체를 지배하고 상부슬라브의 고유진동에 의한 기여도는 크지 않은 것을 보여주고 있다. 이들의 응답 가속도스펙트럼을 그림 9 에 나타냈으며, 해석결과는 가속도 스펙트럼의 전체적인 형상 뿐만 아니라 상부슬라브에서의 최대 가속도가 0.256g 로 시험결과의 0.260g 와 잘 일치하고, 하부슬라브에서도 0.248g 로 나타나 시험결과의 0.239g 와 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 상부구조물 고유진동

수인 11Hz 부근에서는 상부슬라브의 가속도 스펙트럼응답이 실험 및 해석결과에서 0.6g 와 0.5g 로 나타났지만 3Hz 이상에서는 면진구조물의 가속도 지진응답이 전체적으로 입력지진보다 절반 이하로 감소됨으로써 면진구조물이 지진응답을 크게 줄여 준다는 것을 알 수 있다. 해석결과에서 면진베어링의 전단이력은 그림 10 에 나타난 바와같이 최대 28mm 로 이는 면진베어링의 80%전단변형에 해당하는 변위이다.

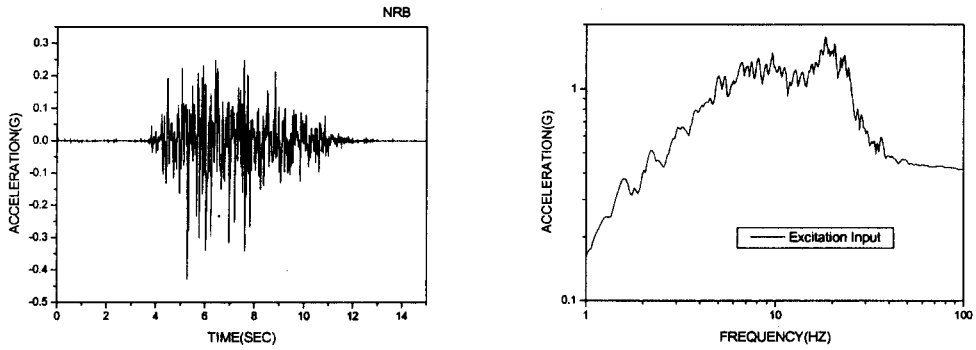

Fig. 5. 가진테이블 위치에서의 가진 시간-가속도 및 스펙트럼(2%)

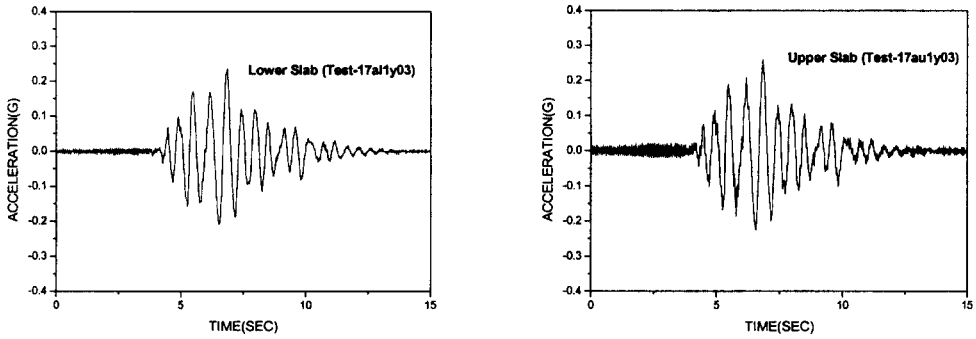

Fig. 6. 상하부슬라브 위치에서의 시간-가속도 응답이력시험결과(2%)

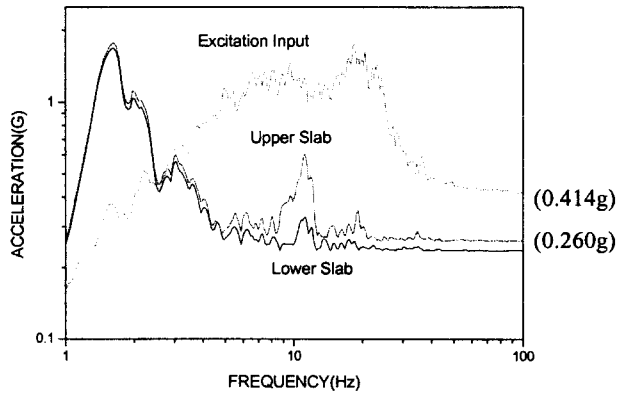

Fig. 7. 면진 시험구조물 시험결과의 가속도 응답스펙트럼(ATH, 0.41g)

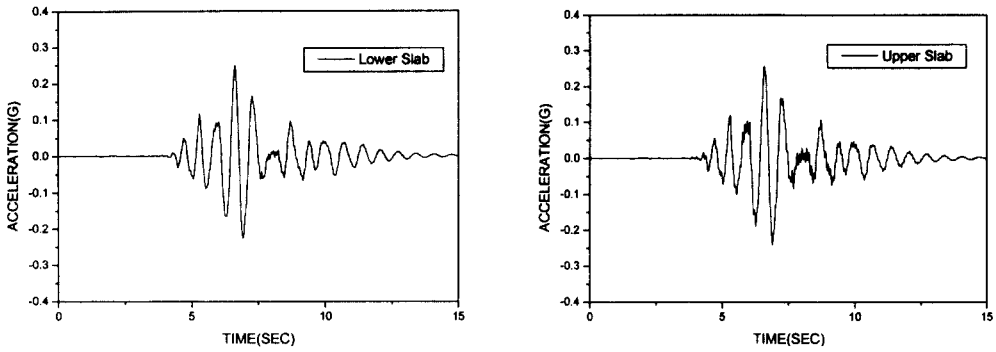

Fig. 8. 면진 시험구조물 상하부슬라브의 가속도 시간이력 해석결과(ATH, 0.41g)

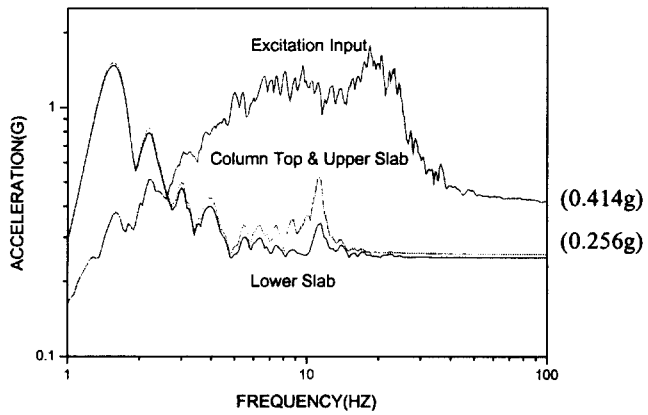

Fig. 9. 면진 시험구조물 ABAQUS 해석결과의 가속도 응답스펙트럼(ATH, 0.41g)

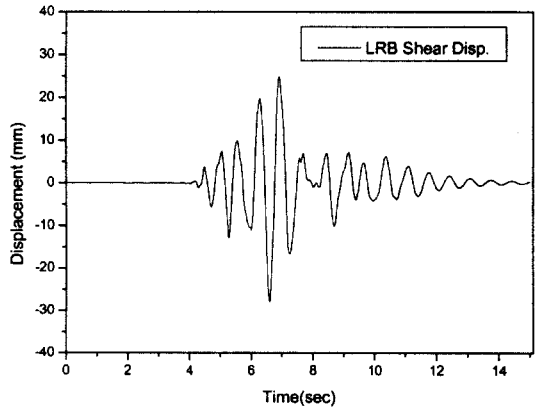

Fig. 10. 면진 시험구조물 면진베어링 전단변위이력 해석결과

4. 결 론

지금까지의 면진 시험구조물 특성 규명을 위한 지진응답 해석결과를 검토하여 볼 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

면진 시험구조물에 대한 지진시간이력 응답해석을 수행할 수 있는 적은 절점을 갖는 단순 보모델을 개발하고 이의 동특성을 상세해석모델로 검증한 결과 개발된 단순모델이 시험구조물의 면진특성과 상부구조물 1차 고유진동수 특성을 비교적 잘 표현하는 것을 알 수 있었다.

개발된 단순 보모델에 대하여 저감쇠 고무 면진베어링의 전단시험결과로부터 계산한 면진베어링 전단강성을 도입하고, 단일방향 가속도 시간이력하중을 입력으로 하여 시험구조물의 지진응답해석을 수행한 결과는 지진응답 시험결과와 매우 잘 일치하였다.

면진 시험구조물의 가속도 지진응답은 입력지진 가속도보다 3Hz 이상에서 50% 이하로 감소되어 면진시스템이 구조물의 지진하중을 줄여주는데 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. 김영중 외(1998), "액체금속로용 면진구조물 지진응답 시험분석," 한국기계연구원, BSG077-541.M, 한국기계연구원.
2. 구경회, 이재한, 이형연, 유 봉(1999), " Stability of Laminated Rubber Bearing and Its Application to Seismic Isolation," KSME International Journal, Vol.13, No.8, pp. 595-604.
3. Bong Yoo, Jae-Han Lee, Gyeong-Hoi Koo, Hyeong-Yeon Lee, Jong-Bum Kim,(2000), "Seismic Base Isolation Technologies for Korea Advanced Liquid Metal Reactor," Nuclear Engineering Design 199, pp. 125-142.
4. 이재한, 구경회, 유 봉(1998), "가진시험용 면진구조물의 동특성 해석 모델링 방법 연구," KAERI/TR-1039/98, 한국원자력연구소.
5. 유 봉, 이재한, 구경회(1997), "액체금속로용 축소규모 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 특성시험 결과 분석," KAERI/TR-809/97, 한국원자력연구소.