

면진시험구조물의 수평가진응답을 활용한 면진장치 비선형 해석모델개발

Nonlinear Analysis Model Development of Seismic Isolator Using Horizontal Seismic Excitation Responses of Isolated Test Structure

이재한* 구경희** 유봉*
Lee, Jae-Han Koo, Gyeong-Hoi Yoo, Bong

ABSTRACT

The seismic excitation test results of an isolated test structure for artificial time history excitation are summarized for structural modeling of the isolated structure and isolation bearing. Based on the actual dynamic behaviors and the seismic responses of the test model, linear and bilinear models for isolators are suggested. Seismic analyses are performed and compared with those of the seismic tests. The developed bilinear model is well applicable only to large shear strain area of isolators.

1. 서론

액체금속로 원자로건물의 특성을 모사한 23 톤 규모의 축소규모 면진시험 구조물을 제작하고, 가진에 대한 면진구조물의 지진응답특성을 확인하기 위한 시험을 1997 년과 1998 년 2 차례 수행하였다. 1 차 시험은 1/8 축소규모 고감쇠 면진베어링에 대한 시험구조물의 여러조건과 El Centro 1940 NS, Mexico 1985, 인공지진(Artificial Time History, ATH) 등 여러 지진하중종류 등 전체 231 경우에 대한 가진응답시험을 수행하였다. 2 차 시험은 면진구조물의 구조강성을 강화시키고 납삽입형 면진베어링과 3 차원 면진베어링에 총 300 여 경우에 대한 가진시험을 수행하였다[1,2].

본 연구에서는 면진된 구조물의 지진응답을 해석할 수 있는 납삽입 면진베어링에 대한 구조해석 모델을 개발하는 것이 목적이다. 이를 위해 1/8 규모 면진베어링 축소모델에 대한 전단변형시험을 통해 얻어진 전단력과 전단변위 이력특성을 정리하고, 이를 이용하여 면진베어링 거동특성을 모사하는 등가선형모델과 Bilinear 모델 등 면진베어링 구조모델과 관련된 자료를 요약하였다 [3,4,5]. 또한, 면진구조물의 지진해석용 단순 보모델과 면진베어링 구조모델을 이용하여 시험에 사용한 인공지진 가속도 시간이력을 입력하중으로 시험구조물의 지진응답을 해석하였으며, 이를 시험 결과와 비교하였다.

* 정회원, 한국원자력연구소, 책임연구원

** 한국원자력연구소, 선임연구원

2. 인공지진에 대한 면진구조물 변위응답

면진 시험구조물은 그림 1 에 나타난 바와같이 하부슬라브, 상부슬라브, 상부슬라브 지지구조물로 구성된다. 시험구조물에 장착된 면진베어링은 액체금속로에 사용되는 면진베어링의 1/8 축소 규모이며, 0.5Hz 로 면진되는 액체금속로와 상사성을 위해 목표 면진주기는 1.41Hz 이다[2].

0.3g 인공지진에 대한 y 방향 가진시험에서 면진베어링 전단변위는 LVDT 변위계측기로 측정 한 값으로 표 1 에 이를 수록하였다. 이 경우에 가진테이블의 변위는 약 8mm 의 변위진폭이 있는 것으로 나타났다. 납봉크기는 27mm(LLRB1), 37mm(LLRB2), 48mm(LLRB3)의 3 종이다.

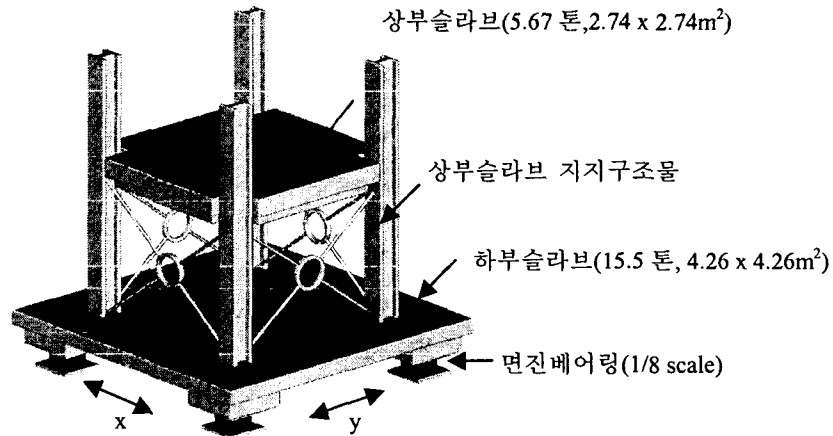


그림 1. 면진시험구조물 개념도

표 1. 면진구조물의 가진시험 면진베어링 전단 변위값 (ATH, Y-dir, 0.3g)

	하부슬라브 변위 (A) (mm)		가진테이블 변위(B) (mm)		전단변위 계산 값(C=A-B)(mm)		최대 전단 변형율(%)	면진주기 (Hz)	Table Input(g)
	최대	최소	최대	최소	최대	최소			
NRB	26.97	-25.5	8.73	-7.63	25.8	-22.26	74.1	1.55	0.413
LLRB1	19.30	-19.39	8.54	-7.45	17.7	-15.5	50.9	1.7	0.383
LLRB2	15.73	-8.89	8.73	-7.63	10.3	-5.0	29.6	2.9	0.451
LLRB3	11.2	-7.2	8.48	-7.39	4.5	-2.25	11.5	3.2	0.433
HLRB	15.4	-15.74	8.60	-9.40	11.97	-12.53	36.0	1.5/2.2	0.395

면진베어링의 종류에 따라 최대전단변위는 NRB 의 경우 25.8mm, LLRB1 과 LLRB2 는 각각 17.7mm 와 10.3mm, LLRB3 는 4.5mm 로 줄어들어 면진베어링 전단변형율은 최대 74%에서 최소 11.5%로 분포된다. 면진베어링의 수평강성은 전단변형량에 따라 달라지며, 그림 2 와 그림 3 에 제시한 면진베어링의 전단변형이력과 변위응답스펙트럼을 참고로 면진주기를 표 1 에 나타냈다.

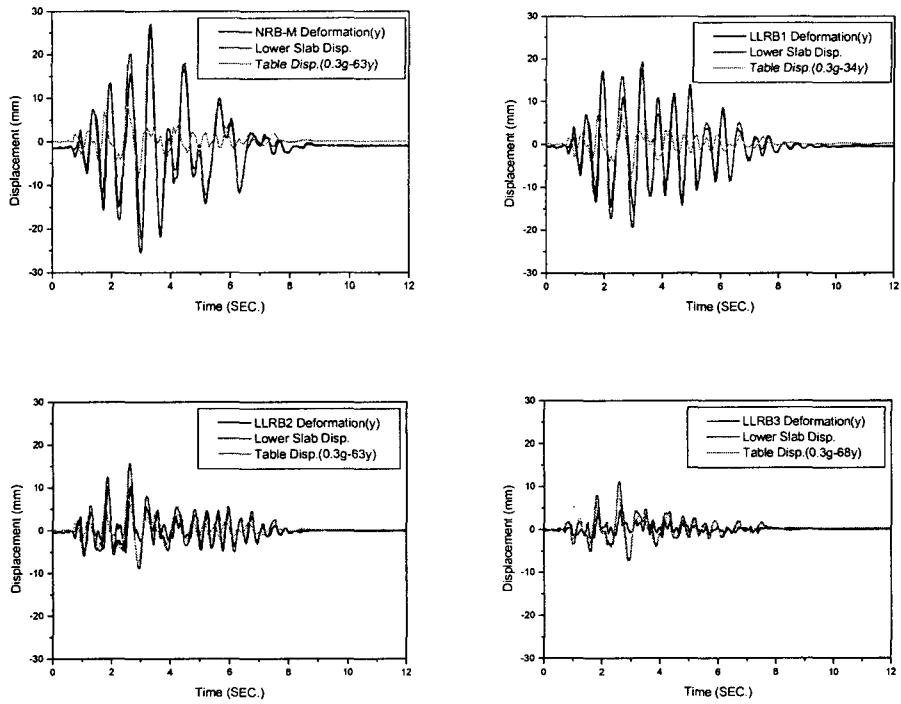


그림 2. 면진구조물 시험에서 면진베어링의 전단변위이력(ATH, Y-dir, 0.3g)

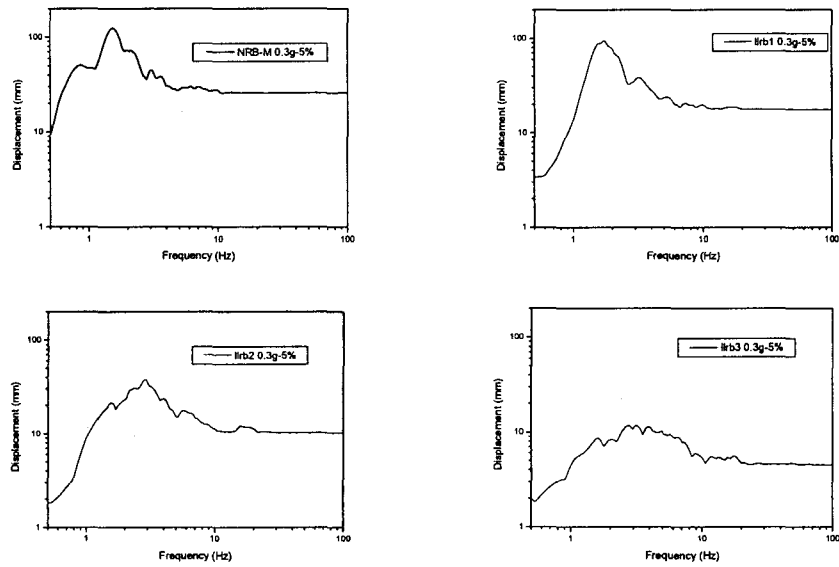


그림 3. 면진구조물 시험에서 면진베어링(LLRB3)의 전단변위스펙트럼(ATH, Y-dir, 0.3g)

3. 면진베어링 성능특성 및 구조모델 변수계산

면진구조물 가진시험의 해석적 접근을 위한 면진베어링 구조모델 변수를 계산하기 위해 납삽입형 면진베어링(LLRB)의 성능특성 시험결과와 전단변위곡선에 대한 특성을 조사하였다. 성능시험 결과내용은 그림 4에 제시한 1/8 규모에 대해 가진주파수 0.05Hz로 25%, 50%, 100%, 150% 전단변형 시험을 수행하였다. 납붕크기 27mm(LLRB1), 37mm(LLRB2), 48mm(LLRB3)의 면진베어링 외경에 대한 납의 직경비는 0.18:0.25:0.32이며, 면적비는 1.0:1.88:3.16이다.

그림 2에서 면진구조물 시간-전단변형량 선도에서 면진구조물이 격은 최대 변위를 찾고, 그림 4의 면진베어링의 특성시험 결과에서 최대 변위에 해당하는 등가강성, 점성감쇠 등을 찾아 표 2에 각각 나타냈다. 표 2에서 전단변형률은 면진베어링이 격은 최대 전단변형량이 되어야 하지만 작은 전단변형률에 대한시험결과가 없어 가까운 자료를 제시하였다.

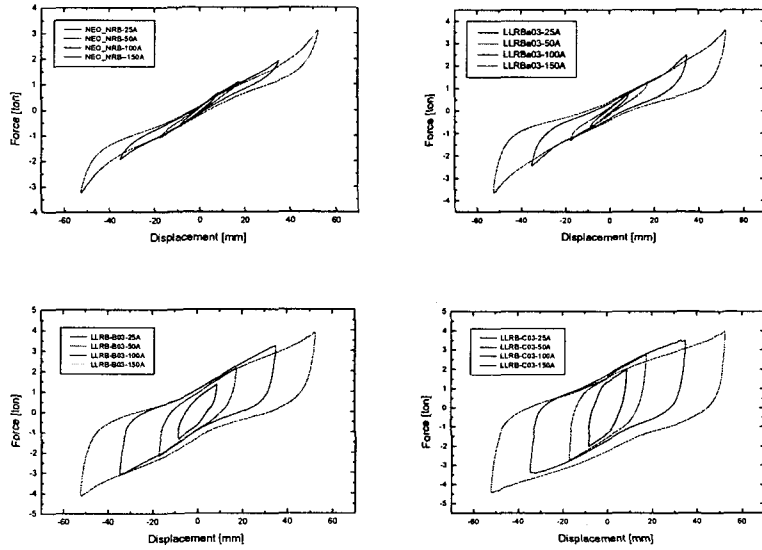


그림 4. 납삽입형 면진베어링 전단이력곡선

표 2. 면진구조물 가진에 따른 납삽입 면진베어링의 특성 예측값 (0.3g)

	NRB	LLRB1	LLRB2	LLRB3
전단변형률	80%	55%	35%	25%
Stiffness (kg/cm)	524.24	670.5	1473	2368
Eqdam(ζ)	0.0192	0.0631	0.2365	0.2931
f_n	1.525	1.724	2.555	3.24

4. 지진응답 해석을 위한 면진베어링 구조모델링

면진베어링 거동의 구조해석모델로는 등가선형모델과 Bilinear, Multilinear, Rate, Ramberg-Osgood 모델 등 다양한 모델이 있으며[6,7], 이들은 면진베어링에 대한 전단특성 시험을 통하여 얻어진 전단력과 전단변위 이력특성자료에 바탕을 두고 여러 가지 프로그램 개발이 있어 왔다. 본 연구에서는 등가선형모델 및 Bilinear 모델의 적용을 위해 ABAQUS 사용자 부프로그램을 이용하였다.

면진베어링의 등가선형모델링에 사용한 등가강성값(K_{eq})과 등가감쇠율(ζ_{eq})은 면진베어링 특성시험결과에서 얻은 면진베어링의 전단력(F)과 변위(X) 사이의 이력곡선 자료를 이용한다[3].

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad \zeta_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} X_{max}^2}$$

이의 구조모델링은 ABAQUS 에서 제공하는 JOINT 요소와 DASHPOT 요소를 사용한다.

면진베어링의 Bilinear 모델링에서는 면진베어링의 이력곡선과 골격곡선의 최외각 곡선을 정의하고 면진베어링의 변형이 이를 따라간다는 가정하에 다음의 모델을 사용한다. 이를 ABAQUS 사용자 정의 프로그램에 적용하기 위해 입력이 요구되는 재료정수는 면진베어링의 히스테릭 곡선을 정의하는데 요구되는 값들로 다음과 같이 5 개를 이용하였다.

A : Cross Section Area of Truss Element

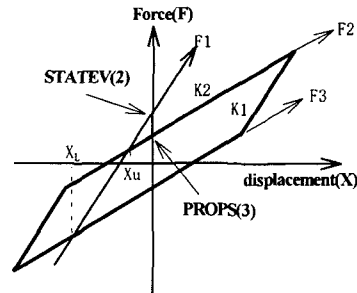
PROPS(1) : 1 차 수평강성(K1)

PROPS(2) : 2 차 수평강성(K2)

PROPS(3) : 항복하중 특성값(Y)

PROPS(4) : K1 강성 한계변위(X_y)

PROPS(5) : 100%전단변위(X_{100})



그리고 사용자정의 변수로는 역하중시 이동경로를 파악하기 위하여 다음을 선정하였다.

STATEV(1) : 예비응력값

STATEV(2) : K1 기울기 직선의 수직축(힘축) 교차점 값

STATEV(5) : 현재의 전단변형율, STATEV(6) : 현재의 항복하중 특성값

면진베어링에 대한 구조모델을 작성하기 위해서는 ABAQUS 의 사용자 재료정의(user defined material) 기능을 갖는 요소가 요구된다. 이러한 특성을 갖는 요소로 *MATERIAL 불릿과 요소특성 정의를 위해 solid 단면을 사용하는 2 차원 TRUSS(C1D2) 요소를 채택하였다.

면진베어링의 특성은 변위와 힘의 관계로 주어지므로 이를 응력과 변형율의 관계로의 변환은 TRUSS 요소의 부재면적을 단위면적으로 하고, 변형율 정의에서 변위를 100% 전단변형률에 해당하는 변위로 나누어줌으로써 달성된다. 그리고 트러스 부재의 탄성계수(Young's modulus) 계산은 다음의 관계식에서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\text{힘} &= \text{스프링강성}(K) \times \text{변위}(X) \\
&= \text{축방향응력}(S) \times \text{단면적}(A) \\
&= [\text{Young's Modulus}(E) \times \text{변형율}(X/L)] \times \text{단면적}(A) \\
E &= \text{스프링강성}(K) \times \text{변위}(X) / [\text{단면적}(A) \times \text{변형율}(X/L)] \\
&= KX/[A(X/L)] \\
&= KL/A \quad (A=1.0) \\
&= KL
\end{aligned}$$

$$\text{Jacobian } (1 \times 1) = \text{del}(S)/\text{del}(e) = E, \quad J = \text{DDSDE}(1,1)$$

이 과정에서 면진베어링이 움직일 때 전단 변형위치에 따른 순간 순간의 강성값을 결정하기 위하여 변형율 변화분의 증가방향과 감소방향을 판단하고, 변형율 변화에 해당하는 새로운 강성을 이력곡선 또는 골격곡선에서 찾는 사용자 정의 프로그램을 작성하였다.

면진베어링의 이력곡선은 최대 전단변형량에 따라 항복하중특성값이 바뀌는 특성을 갖고 있다. 이를 보완하는 방법으로 새로운 이력곡선을 결정할 때 바로 전에 경험한 전단변형량의 크기를 고려하여 항복하중 특성값을 결정해 주는 논리를 채택한다.

5. Bilinear 모델을 이용한 면진구조물 지진응답해석

지진응답 시간이력해석을 위해 전체 절점 수가 16 개이고, 요소 수가 14 개로 이루어진 단순 보모델을 작성하였으며, 각 요소 부재의 치수와 재료강성은 전체시스템 특성에 맞게 조절하였다. 면진 및 비면진된 경우에 대하여 고유진동수를 해석한 결과를 표 3에 나타냈다.

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) 100% 전단변형의 경우로 수평강성은 495.6Kg/cm 사용.

면진베어링 성능특성 시험결과에서 25%-100% 전단변위 값을 기준으로 ABAQUS 의 사용자 정의 부프로그램에 사용되는 Bilinear 모델에 적용한 변수값을 계산하여 표 4에 나타내었다. 여기서

K1 은 면진베어링 초기 전단강성이고, K2 는 면진주파수에 크게 영향을 주는 2 차 강성으로, K1 은 K2 의 4 배 값을 사용하였으며, 길이 L 은 100% 전단변형량을 나타내며, Xy 는 원점을 지나는 K1 과 K2 가 만나는 X 축 좌표이며, 기울기는 K2 의 기울기를 나타낸다. Bilinear 모델 변수값을 이용하여 4 개의 납삼입형 면진베어링에 대하여 면진베어링 전단변형량, 구조물의 상단/하단에서의 지진응답해석 결과를 표 5 에 나타냈으며, 지진응답결과에서 면진베어링의 전단변형이력을 그림 7 에 나타냈다.

표 4. ABAQUS 해석에 활용할 Bilinear 모델 변수값

가진 주파수	베어링 종류	Stiffness 1 (kgf/mm)	Stiffness 2 (kgf/mm)	항복하중 특성값(kgf)	Xy (mm)	L (mm)	기울기 (K2)
0.05 Hz	NRB	198.8	49.7	139	0.93	34.0	0.620
	LLRB1	199.3	49.8	342	2.29	34.0	0.786
	LLRB2	231.2	57.8	1009	5.82	34.0	0.417
	LLRB3	222.9	55.7	1700	10.16	34.0	0.266

표 5. 구조모델을 이용한 ABAQUS 해석결과

Isolator	Upper Slab Acc. Bilinear Model (g)		Displ. of LRB Test Results (mm)		Displ. of LRB Bilinear Model (mm)		Displ. of LRB Linear Model (mm)	
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
NRB	0.219	-0.189	25.8	-22.26	22.49	-18.53	27.2	-25.25
LLRB1	0.177	-0.191	17.7	-15.5	16.36	-12.14	15.24	-15.65
LLRB2	0.264	-0.364	10.3	-5.0	7.16	-11.59	4.57	-6.84
LLRB3	0.478	-0.551	4.5	-2.25	8.32	-14.23	2.84	-5.04

해석결과에서 알 수 있는 바와같이 면진베어링 등가선형모델은 시험과 잘 일치하고 있다. 그리고 Bilinear 모델을 사용한 경우 NRB 와 LLRB1 의 결과는 면진베어링 전단변형량에서 시험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 납봉의 직경이 큰 LLRB2 와 LLRB3 의 경우 면진베어링 최대 전단변형량이 시험보다 매우 크게 나타났다.

면진구조물 가진시험에서 면진베어링 최대 전단변형량을 나타낸 표 1 에서 보는 바와같이 면진베어링 최대 전단변형량이 LLRB2 에서는 30%, LLRB3 에서는 12%로 나타났다. 그러나 현재의 면진베어링 거동특성 시험자료는 최소 전단변형량이 25%로 이 보다 작은 영역에서는 면진베어링의 거동 특성을 표현하지 못한다. 이러한 이유로 현재의 BILINER 모델의 정의가 25%이상의 전단변형영역에 맞추어져 있기 때문에 LLRB2 와 LLRB3 의 해석결과는 시험결과와 일치하지 않았다.

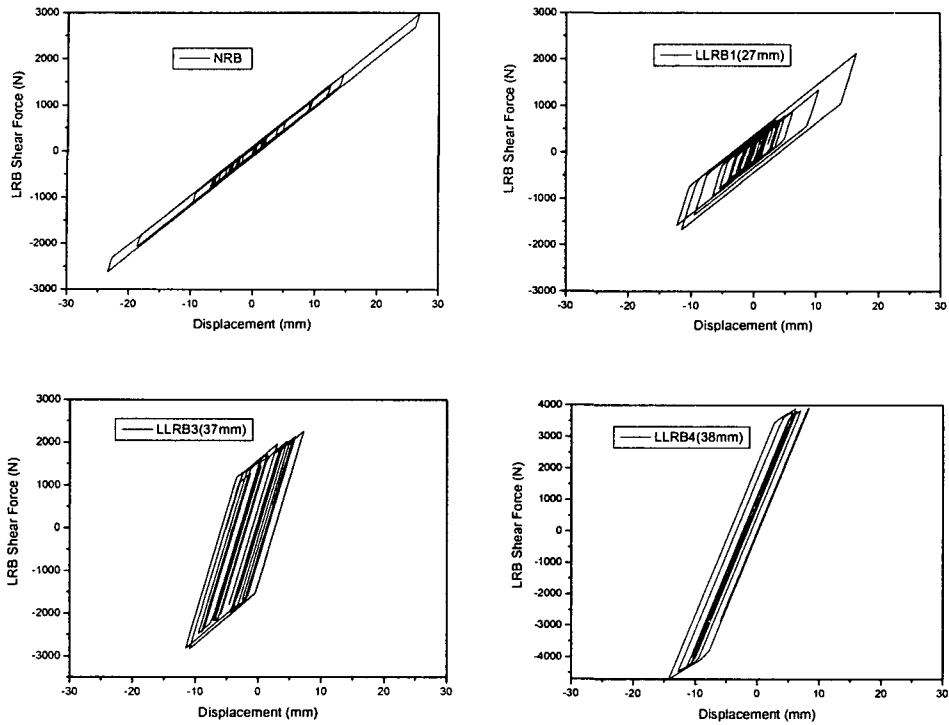


그림 7. Bilinear 구조모델을 이용한 면진구조물 해석의 면진베어링 전단변형이력 특성

6. 결론

면진시험구조물의 가진시험 결과 중에 응답가속도, 면진베어링 변형량 등에 대하여 기술적으로 요약하고, 면진구조물 지진시간이력 해석용 단순모델에 대한 기술적 검토가 수행되었다. 단순모델을 이용하여 면진구조물의 가진특성을 모사하기위해 시험에 사용된 4 종류의 면진베어링에 대한 등가선형모델 및 Bilinear 모델을 면진베어링 제작 후에 기 수행한 면진베어링 특성시험결과를 이용하여 개발하였다.

면진구조물과 면진베어링 구조모델을 이용한 지진응답이력 해석을 수행한 결과 납삽입형 면진베어링에 대한 선형 모델의 경우 면진베어링의 변위응답을 비교적 잘 표현하고 있었다. Bilinear 모델을 이용한 해석의 경우 면진베어링의 납봉 크기가 48mm 로 큰 경우에 면진베어링 전단변형이력이 증가하는 것으로 나타나는 등 내용 면에서 시험결과와 매우 다른 비공학적 결과를 주었다

이러한 해석결과와의 불일치를 해소하기 위해 전단변형이 작은 부분에서의 면진베어링 특성시험을 수행하여 면진베어링의 비선형 특성을 전단변형이 작은 영역에서 좀더 규명하고 Bilinear 구조모델을 보완할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 유봉, 이재한, 구경희, 액체금속로 면진설계를 위한 축소규모 납삽입 및 3 차원 면진베어링의 특성시험결과 분석, KAERI/TR-1362/99, 한국원자력연구소, 1999.
2. 이재한, 유봉, 구경희, 가진시험용 면진구조물의 동특성해석 모델링 방법 연구, KAERI/TR-1038/99, 한국원자력연구소, 1999.
3. 유봉, 이재한, 구경희, 면진베어링에 의해 지지된 면진구조물의 지진응답해석, 한국전산구조공학회 - 학술발표회 논문집(pp. 99-106),1995.
4. 유봉, 이재한, 구경희, 액체금속로 면진시험구조물의 해석모델링 개발 및 지진응답비교, 한국지진공학회 춘계학술발표회, 2001.3.
5. B. Yoo, J.-H. Lee, G.-H. Koo, "Effects of Lead Plug in Lead Rubber Bearings on Seismic Responses for an Isolated Test Structure," The 16th SMiRT, Washington DC, USA, August, 2001.
6. 구경희, 이재한 등, "수정히스테리틱 Bilinear 면진베어링 모델을 사용한 지진 응답감소," 대한기계학회 논문집, 제 20 권 제 1 호, pp.127-134,1996.
7. B. Yoo, J.-H. Lee, G.-H. Koo and D.G. Lee, "Seismic Isolation for Nuclear Reactors in Korea," The 12th Post-SMiRT, Santiago, Chile, August, 1995.