

1/4축소 철골구조물을 이용한 건물 기초분리장치의 진동대실험

Shaking Table Tests of a 1/4-Scaled Steel Frame with Base Isolators

송 영 훈* 김 진 구**
Song, Young Hoon Kim, Jin Koo

국문요약

지진에 의한 진동이 건물에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 강철 스프링에 천연고무 및 합성고무를 피복 성형한 새로운 형태의 기초분리장치를 개발하고 물성실험을 실시하였으며 모형구조물에 부착하여 진동대실험을 수행하였다. 사용된 모델은 1/4로 축소된 1경간 3층의 철골구조물로 지진 진동을 사용하여 기초분리장치의 수평, 수직방향 안정성과 제진효과를 검증하였다. 얻어진 데이터를 분석한 결과 실험에 사용된 모든 종류의 방진베어링이 지진진동에 의한 가속도를 줄이는데 효과적인 것으로 나타났다.

주요어 : 지진진동, 기초분리장치, 축소모델, 진동대실험

ABSTRACT

New form of base isolators made of steel spring coated with both natural and artificial rubber were manufactured and tested for material properties. Shaking table experiments were performed using a model structure attached with the bearings. The model structure used in the test is a 1/4 scaled steel structure, and earthquake records were used to check the lateral and vertical stability and effectiveness of the isolators. According to the results all three types of isolators turned out to be effective in reducing the acceleration induced by the earthquake vibration.

Key words : earthquake vibration, base isolators, scaled model, shaking table tests

1. 서 론

건물에 사용되는 기초분리장치(base isolator) 또는 방진베어링은 원래 건물을 지반으로부터 분리시키고 건물의 고유진동수를 낮추어 지진과 같은 동적 하중에 의한 건물의 손상 및 거주성의 침해를 효과적으로 저감시킬 수 있는 목적으로 개발되었으며 미국의 서부지역이나 일본등 지진의 위험이 높은 지역을 중심으로 많이 적용되어 왔다. 지진활동이 비교적 적은 지역이라 할지라도 원자력발전소나

LNG탱크등 대형 위험시설에 사용이 증가하는 추세에 있다.

본 논문에서는 구조물에 입력되는 수평 및 수직 진동을 효과적으로 제어하기 위한 목적으로 기존의 적층고무반침과 스프링에 고무를 피복한 새로운 형태의 방진베어링을 제작하고, 1/4로 축소된 철골 모형 구조물을 이용한 진동대 실험을 통하여 지진의 수직 및 수평방향 하중에 대한 안전성 및 진동 저감 성능을 검증하였다. 지진하중으로는 El Centro 지진의 수평(NS) 및 수직성분을 이용하였으며 실험체의 횡강성을 고려하여 수평방향 하중의 크기를 1/4이하로 줄여서 실험하였다.

* 삼성건설 기술연구소, 선임연구원

** 정회권 · 삼성건설 기술연구소, 선임연구원

2. 기초분리장치의 제작 및 물성실험

본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 범용고무인 Natural Rubber(NR)와 합성고무인 Polynorbonene(PNR)을 사용하여 일반적인 적층 고무받침 방식(rubber mount, RM)(그림 1a)과 금속 스프링에 고무를 피복 성형한 형태(NR, PNR)(그림 1b)의 두 종류를 개발하였으며 그 크기 및 물성은 실험에 사용될 모형 구조물의 질량과 고유 진동수를 고려하여 제작되었다.

구조물 모델실험을 위한 기존의 적층탄성받침(RM)은 고무 내부에 Steel Shim 1개를 삽입하여 설계하였다. 금속스프링에 NR과 PNR을 피복 성형한 기초분리장치는 금속스프링에 의하여 낮은 고유진동수의 구현이 가능하고 고무의 에너지소산 성질을 최대한 이용할 수 있는 장점이 있으나 내진안정성 및 실용성에 대한 검증이 필요하였다. 금속 스프링에 고무를 입힌 베어링은 RM베어링에 비해 수직강성이 작아 모형구조물의 각 기둥 하부에 두 개씩 설치하도록 설계하였다.

개발된 기초분리장치에 대한 수직방향의 정적, 동적 특성실험을 수행하였으며 정적 실험 결과는 그림 2에 나타나 있다. NR 베어링에 비해 PNR은 하중이 증가함에 따라 strain hardening현상이 두드러지는 것을 알 수 있다. 동적실험은 베어링을 사각형의 모서리에 배치하고 그 위에 1.2 ton의 철판을 올려놓고 충격하중을 가하여 시스템의 고유진동수, 모드형상, 감쇠비 등을 구하였으며 그 결과는 표 1에 정리하였다.

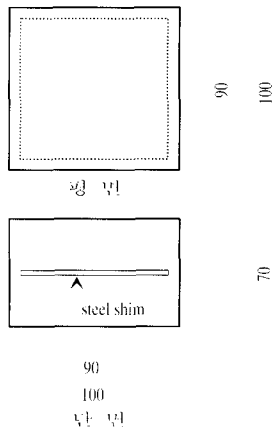


그림 1(a) 적층탄성받침

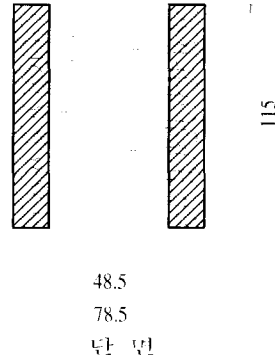


그림 1(b) 고무-스프링 기초분리장치

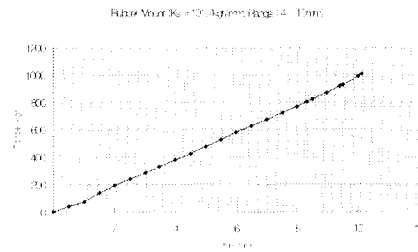


그림 2(a) 적층고무받침의 변형특성

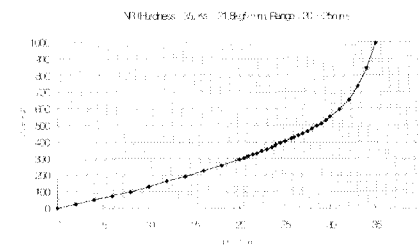


그림 2(b) NR-스프링 기초분리장치의 변형특성

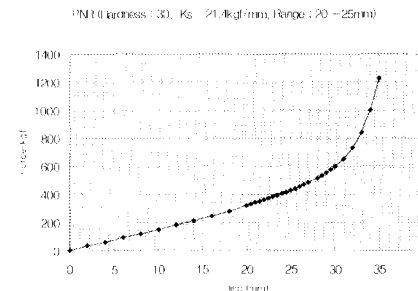


그림 2(c) PNR-스프링 기초분리장치의 변형특성

표 1 기초분리장치의 동적 특성 실험결과

Mode	기초분리장치	적층탄성 발침	PNR-금속스프링	NR-금속스프링	금속스프링	비 고
	정적 스프링상수 (MN/m)	0.99666	0.20972	0.21364	0.077224	
1차	고유진동수	9.945Hz	8.293Hz	4.695Hz	3.73Hz	Heaving
	Damping	4.567%	17.505%	5.802%	0.527%	
	동배율	1.169	3.864	1.215	1.061	
2차	고유진동수	14.112Hz	-	-	5.28Hz	Rolling
	Damping	4.337%	-	-	0.313%	
	동배율					
3차	고유진동수	16.093Hz	17.002Hz	7.563Hz	5.94Hz	Pitching
	Damping	4.79%	16.63%	5.172%	0.376%	
	동배율					

3. 구조물 모델 실험

개발된 방진베어링의 성능을 검증하기 위하여 모형구조물의 하부에 방진베어링을 설치하고 진동대를 이용한 구조물 모델 실험을 수행하였다. 모델하부에 설치한 방진베어링은 RM, NR, 그리고 PNR의 3가지 유형으로서 각 유형별로 실험을 수행하여 방진베어링을 장착하지 않은 모형구조물 실험결과 비교, 분석하여 방진베어링의 성능을 검증하였다. 입력 진동데이터는 El Centro 지진가속도의 수평 및 수직 성분이며 크기를 다양하게 변화시켜가면서 실험하였다.

3.1 모형구조물 및 진동대의 형상

모형구조물의 구조형식은 각 방향으로 1개의 경간과 3층으로 만들어진 철골 골조 형식으로 1/4 축소모델이다(그림 3). 단변과 장변의 경간의 비는 1 : 2 이며 단변방향을 가새로 보강하여 2차원 평면골조로 거동하도록 하였다. 각층의 바닥은 거더 위에 슬라브의 역할을 하는 보를 배치함으로써 diaphragm 거동을 나타내도록 하는 역할하게 하였다. 고정하중의 효과 및 진동실험에서 질량효과를 주기 위하여 각층 바닥에 907kg의 철판을 올려놓고 거더 위에 볼트를 이용하여 고정함으로써 모든 하중이 모델의 바닥에 집중되는 Lumped Model에 의한 동적해석이 가능하게 하였다. 모형구조물의 형상과 치수는 그림 3(a)에 나타나 있으며 각 부재별 치수 및

단면형상에 따른 단면적과 단면 2차 모멘트를 표 2에 정리하였다.

실험에 사용된 진동대 크기는 3.6m × 3.6m이며 수평방향으로 2대의 actuator와 수직방향으로는 진동대의 각 모서리에 1대씩 총 4대의 actuator가 설치되어 수평과 수직 그리고 회전이 가능한 3방향의 자유도를 구현할 수 있다(그림 4b). 진동대가 받을 수 있는 최대수직하중은 50t이며 최대하중 상태에서 수평, 수직 모두 1.15g까지의 가속도와 수평 180 cm/sec, 수직 86cm/sec의 속도를 줄 수 있다. 진동대가 움직일 수 있는 최대변위는 수평 15cm, 수직 7.5cm까지 가능하며 표현가능한 주파수 범위는 50Hz이다.

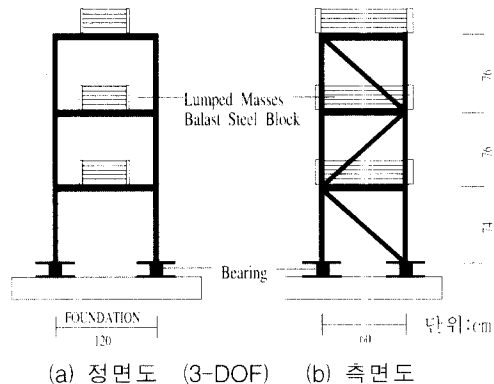


그림 3 모형구조물의 형상 및 치수

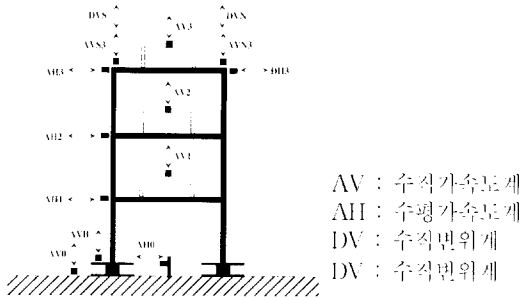


그림 4(a) 변위계와 가속도계의 설치도



Horizontal Actuators Vertical Actuators

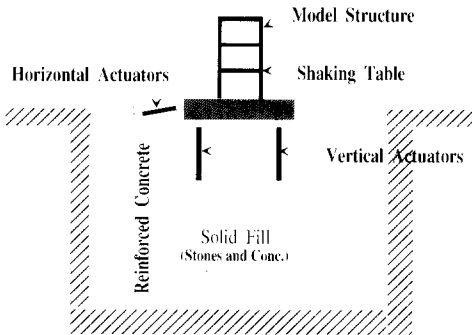


그림 4(b) 진동대의 구조 및 형상

표 2 모형구조물의 단면성질

부재	단면적	단면 2차 모멘트	비고
기둥	10.3 cm ²	24.6 cm ⁴	1 층
기둥	6.7 cm ²	6.0 cm ⁴	2, 3 층
거더 및 보	6.7 cm ²	6.0 cm ⁴	
가새	6.7 cm ²	6.0 cm ⁴	

3.2 측정장치 및 실험변수

모형구조물의 입력진동에 대한 응답을 측정하기 위하여 구조물의 각 부분에 총 11개의 가속도계와 4개의 변위계(LVDT)를 설치하였다. 모형구조물 하부에 직접적으로 작용하는 입력진동이력은 컴퓨터를 통해 actuator에 입력되는 진동데이터가 진동대를 거치면서 변화되는 것을 사용해야 하기 때문에 진동대 바닥위에 수평, 수직방향의 가속도계를 설치하였다. 각 층마다 가속도계를 설치하여 각 층의 가속도응답을 측정하였으며, 3층의 양단에는 수직가속도계와 수직변위계를 설치하여 모형구조물의 rocking현상(좌우로 흔들리는 현상)을 측정하였다. 또한, 진동대 바닥위에 수직방향의 변위계를 설치하고 3층에는 수평변위계를 설치하여 각 방향의 변위를 측정하였다. 가속도계와 변위계의 위치 및 방향은 그림 4 (a)에 나타나 있다. 가속도계와 변위계를 통하여 측정된 데이터는 64 CHANNEL SWITCH BOXES, DATA LOGGER와 CONTROLLER를 거쳐 컴퓨터에 저장되도록 하였다 (그림 5).

또한 실험변수로는 기초분리장치의 종류, 지진입력의 방향 및 크기, 구조물 모형의 고유진동수 등을 변화시키며 실험을 수행하였다. 방진베어링을 설치하지 않고 모형구조물을 직접 진동대 위에 고정시켜 실험한 결과(FIX)와 세가지 유형의 방진베어링(NR, PNR, RM)을 설치한 후 그위에 모형구조물을 설치하여 실험한 결과를 비교하였다. 입력진동데이터로는 백색파(white noise)와 El Centro지진의 수평 NS성분, 수직성분을 사용하였으며 먼저 수직, 수평 성분을 각각 입력하여 실험한 후 두 성분을 동시에 가하고 응답을 측정하였다. 또한 각각의 입력진동의 최대가속도를 여러 가지 크기로 변화시켜 가며 결과를 측정하였으며 본 논문에서는 최대 두개의 입력가속도에 대한 결과만을 기술하였다. 표 3은 입력진동의 최대가속도를 나타낸다. 구조물의 특성을 바꾸기 위해 기존의 3자유도 모형을 대상으로 실험을 한 후 2층과 3층에 X-자형 가새를 설치하여 1자유도계 시스템으로 바꾸고 같은 실험을 반복하여 결과를 비교하였다.

3.3 실험 결과 및 분석

방진베어링의 유부와 종류에 따라 각 모형구조물의 수직방향에 대한 백색파실험을 통하여 전달함수(Transfer Function)를 구하였으며(그림 6) 이를 토

대로 얻어진 각 모형구조물에 대한 고유진동수는 표 4에 나타나 있다. 모든 경우 베어링이 없을 때와 비교하여 모델의 고유진동수가 저주파수 영역으로 이동한 것을 볼 수 있다. 특히 방진베어링의 설치에 따라 수직방향 1차 모드의 고유진동수가 급격히 떨어졌으며 고차로 갈수록 떨어지는 비율이 낮아지는 현상이 나타났다. 전체적으로는 NR 방진베어링을 설치한 것이 제일 낮은 고유진동수를 보이고 있으나 그 차이는 그리 크지 않다는 것을 알 수 있다.

지진하중에 대한 모형구조물의 응답은 각층에서 가속도센서와 변위계를 이용하여 측정하였다. 방진베어링을 설치하지 않은 경우 대부분의 응답가속도가 바닥에서의 최대가속도인 AH0보다 크게 나왔으며 3층에서의 응답가속도가 전반적으로 제일 큰 경향을 띠고 있다. 그림 7은 구조물 하부에 NR베어링을 설치한 경우 바닥에서 측정된 가속도와 최상부에서 측정된 가속도의 시간이력과 스펙트럼을 비교한 것이다. 제작된 NR와 PNR 베어링은 RM보다 횡강성이 작고 비탄성 영역에서의 거동에 대한 실험이 선행되지 않았으므로 탄성영역에서의 안전한 실험을 위하여 수평방향 최대 지반가속도를 0.078g로 줄여 실험하였다. 결과에 따르면 베어링에 의해 3층에서의 가속도의 절대값이 대폭 감소한 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 El Centro 지진의 주요 주파수 성분이 구조물의 진동수보다 크고 베어링에 의하여 구조물의 진동수가 저주파수 영역으로 이동하기 때문이며 만약 Mexico 지진과 같이 장주기 성분이 많은 지진에 대해서는 본 연구에 사용된 기초분리장치가 더욱 불리하게 작용할 수 있다. 그림 7b에 나타난 진동대 바닥에서 측정된 지진입력의 수직성분은 진동대 자체와의 공진에 의해 실제보다 고주파영역이 매우 증폭되어 나타났음을 알 수 있다.

입력지진의 최대가속도의 크기가 일정하지 않기 때문에 방진베어링의 성능을 비교하기 위해 입력지진의 최대가속도(AH0)에 대한 최고층의 최대가속도(AH3)의 비율을 구하였으며 이에 대한 결과는 표 5에 나타나 있다. 1DOF시스템에 있어 AH0에 대하여 AH3는 NR인 경우 80.0%, PNR과 RM인 경우 79.1%의 가속도 저감효과가 있었다. 3DOF시스템의 경우도 거의 동일 하며 그 저감비율은 각각 77.4%(NR), 83.3%(PNR), 82.3%(RM)이다. 평균응답가속도에서는 PNR베어링의 저감효과가 가장 높게 나타났으며 76.2%의 저감효과가 있었다. 3DOF의

경우도 마찬가지로 80.1%의 가속도가 저감되었다. 이러한 경향은 지진의 수직성분에 의한 응답가속도의 비교에서도 잘 드러나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 베어링이 설치되지 않았을 경우 지진입력가속도에 비해 최대가속도가약 3.7배에서 4.5배까지 증가한 것에 비교하면 방진베어링이 지진에 대하여 매우 효과적임을 알 수 있다.

표 6은 바닥과 최상층의 최대 상대변위를 나타내며 1DOF시스템에 있어서는 방진베어링을 설치하였을 경우 그렇지 않은 경우보다 최대 변위율이 약간 증가하였으며 3DOF인 경우는 반대로 약간 감소하는 경향을 보인다. 수직방향의 최대 상대변위는 두 경우 모두 베어링이 설치되었을 때 매우 증가하였으며 이러한 경향은 NR베어링에서 다소 두드러짐을 알 수 있다.

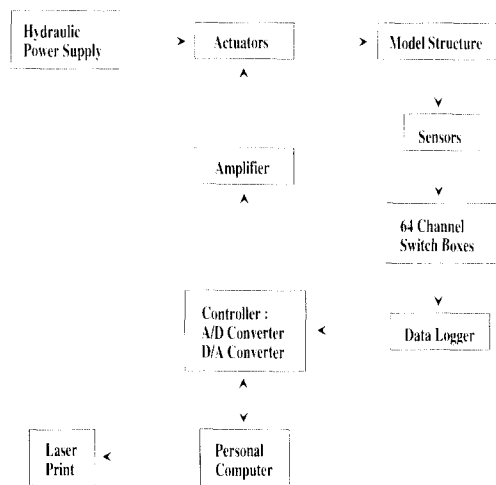


그림 5 계측 시스템도

표 3 입력지진의 최대가속도

입력 지반진동	구분	최대 가속도
vertical white noise	VWN.01, VWN.02	0.057, 0.114
vertical El Centro	VEL.01, VEL.02	0.187, 0.374
horizontal white noise	HWN.01, HWN	0.025, 0.050
horizontal El Centro	HEL.01, HEL.02	0.034, 0.068
vertical and horizontal El Centro	HVEL.02	0.068

표 4 백색파실험에 의한 모형구조물의 고유 진동수

TYPE	수직방향 고유진동수(Hz)			수평방향 고유진동수(Hz)		
	1차	2차	3차	1차	2차	3차
FIX	17.0	21.5	26.5	2.2	7.0	13.9
NR	5.5	17.6	23.5	1.2	5.2	12.4
PNR	7.6	17.6	23.5	1.3	6.0	12.5
RM	6.5	17.5	23.0	1.1	5.0	10.2

표 5(a) 최대 입력가속도에 대한 최대 응답가속도의 비(1DOF)

Input	AH3/AHO			
	Fixed	NR	PNR	RM
HEL01	3.82	0.77	0.80	0.80
HEL.02	3.78	0.80	0.83	0.86
HWN.01	2.18	0.81	0.64	0.75
HWN.02	2.18	0.78	0.65	0.71
HVEL.02	3.77	0.89	0.84	0.86
VEL.01	1.68	0.57	0.85	0.80
VEL.02	1.49	0.67	0.81	0.71
VWN.01	2.02	0.58	0.67	0.57
VWN.02	1.93	0.48	0.63	0.61

표 5(b) 최대 입력가속도에 대한 최대 응답가속도의 비(3DOF)

Input	AH3/AHO			
	Fixed	NR	PNR	RM
HEL01	4.52	1.02	0.79	0.80
HEL.02	4.55	1.09	0.76	0.99
HWN.01	3.57	1.06	0.92	1.30
HWN.02	3.09	1.27	0.80	1.04
HVEL.02	4.43	1.06	0.75	0.96
VEL.01	2.84	0.44	0.86	0.77
VEL.02	3.50	0.43	0.88	0.62
VWN.01	1.31	1.00	0.19	0.64
VWN.02	0.61	0.24	0.20	0.61

표 6(a) 상대변위의 최대값(in)(1DOF)

Input	DH3-DHO			
	Fixed	NR	PNR	RM
HEL01	0.068	0.091	NA	0.103
HEL02	NA	NA	0.180	0.169
HWN.01	0.056	0.085	0.060	0.084
HWN.02	0.108	0.161	NA	0.177
HVEL.02	0.152	NA	NA	0.174
VEL.01	0.017	0.092	0.048	0.068
VEL.02	0.030	0.198	0.090	0.144
VWN.01	0.008	0.029	0.020	0.033
VWN.02	0.013	0.064	0.034	0.088

표 6(b) 상대변위의 최대값(in)(3DOF)

Input	DH3-DHO			
	Fixed	NR	PNR	RM
HEL01	0.161	0.129	0.078	0.140
HEL02	0.296	0.235	0.151	0.242
HWN.01	NA	0.095	NA	NA
HWN.02	0.145	0.171	0.150	NA
HVEL.02	NA	0.238	0.154	0.247
VEL.01	0.030	0.083	0.087	0.069
VEL.02	0.023	0.129	0.095	0.121
VWN.01	0.013	0.000	0.016	0.032
VWN.02	0.013	0.037	0.031	0.061

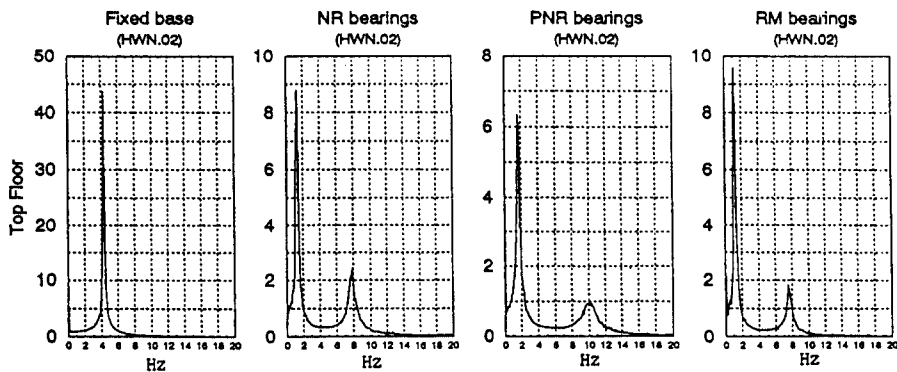


그림 6(a) 1DOF 모델의 수평 전달함수

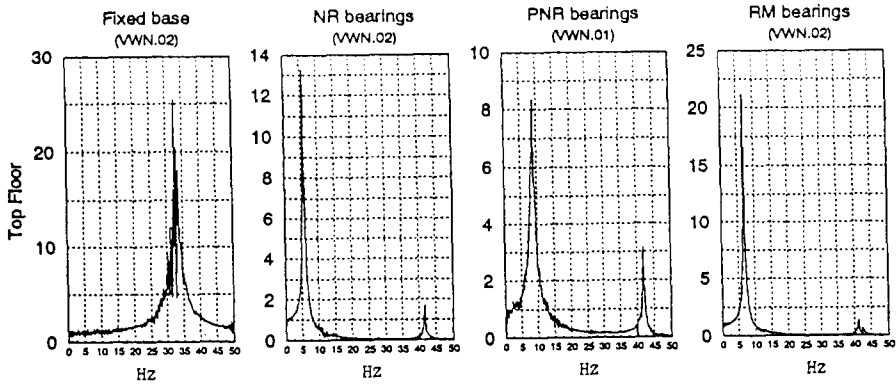


그림 6(b) 1DOF 모델의 수직 전달함수

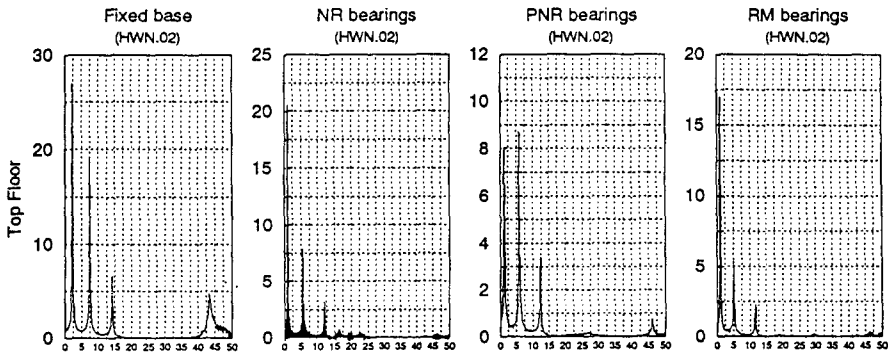


그림 6(c) 3DOF 모델의 수평 전달함수

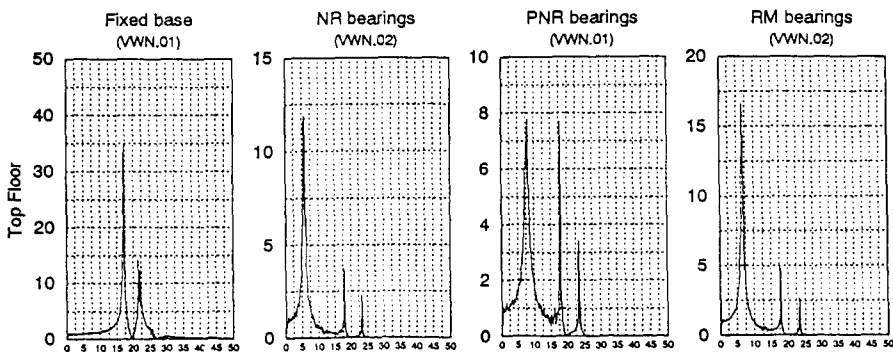


그림 6(d) 3DOF 모델의 수직 전달함수

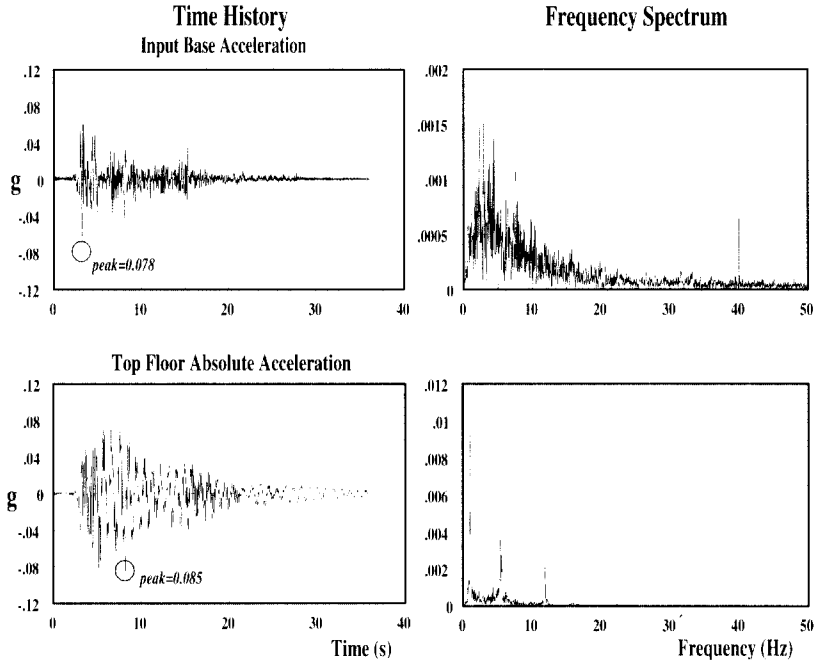


그림 7(a) NR베어링이 설치된 3DOF 모델의 수평 가속도 응답

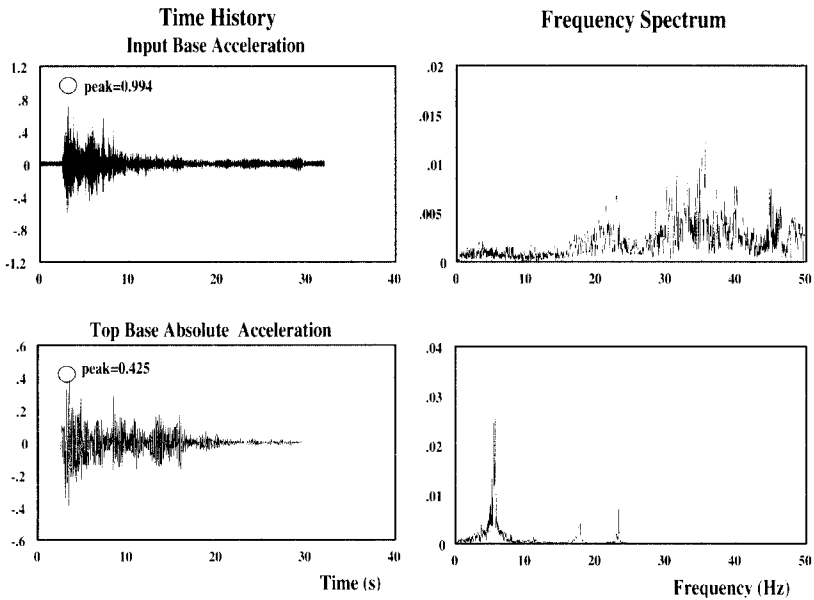


그림 7(b) NR베어링이 설치된 3DOF 모델의 수직 가속도 응답

4. 결 론

1/4로 축소된 모형구조물 하부에 기존의 적층고무방식과 금속스프링에 고무를 피복한 새로운 형태의 방진베어링을 설치하고 El Centro지진에 대한 진동대 실험을 실시한 결과 방진베어링에 의해 고유진동수가 저주파수 영역으로 이동하게 되어 지진에 의한 진동을 효율적으로 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

베어링을 장치하지 않았을 경우와 비교하면 세 종류의 베어링 모두 건물에 전달되는 지반 가속도를 저감하는데 큰 효과가 있는 것으로 판명되었으며 그중에서도 PNR베어링이 가장 효과적으로 나타났으나 그 차이는 그리 크지않다.

방진베어링에 의하여 최대 수평변위는 경우에 따라 적은 양의 증가가 있었으며 전반적으로 볼 때 주어진 하중의 크기에서는 만족할 만한 결과를 얻었다.

스프링에 고무를 피복하여 고유진동수를 낮추고 감쇠비를 높인 형태의 기초분리장치는 기존의 적층고무베어링과 비교할 때 수평뿐 아니라 지하철진동과 같은 수직 방향의 진동성분을 효과적으로 저

감시킬 수 있는 장점이 있는 것으로 평가된다. 또한 그리 크지 않은 수평 진동에 대해서 충분한 강성을 지닌 것으로 밝혀졌다. 하지만 본 실험에서 시도되지 않은 강진에 대한 안전성의 검증이 필요하며 스프링의 강성, 고무의 성능 등의 효과적인 조합과 시스템의 내구성 확보를 통하여 지하철에 의한 수직진동 뿐아니라 지진에 의한 횡방향 진동에 대해서도 더욱 효과적인 기초분리 시스템으로 발전시킬 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구에 사용된 기초분리장치는 '유니슨산업'에서 제작되었으며 제작 및 실험에 도움을 주신 유니슨산업 기술연구소의 김두훈 소장 및 권형오 선임 연구원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. "고속철도 환경소유기준 및 진동기준에 대한 연구", 한국고속철도 건설공단, 1995.
2. "지하철 5,7,8호선 레도광사 시공감리용역 과업수행보고서", 서울특별시 지하철건설본부, 1994.