

〈논 문〉

지하철 진동에 대한 철골건물 기초진동 절연장치의 개발 및 진동대 실험

Development and Shaking Table Tests of a Base Isolator for Controlling Subway Train-Induced Vibration of a Steel Building

김 진 구* · 송 영 훈** · 권 형 오*** · 허 영****

Jin-koo Kim, Young-hoon Song, Hyong-oh Kwun and Young Huh

(1997년 4월 11일 접수 ; 1997년 7월 31일 심사완료)

Key Words : Subway Train Vibration(지하철진동), Base Isolator(기초진동절연장치), Shaking Table Test(진동대 실험), Scaled Model(축소모형), Vibration Reduction(진동저감)

ABSTRACT

In this study a conventional rubber mount and a new form of base isolator made of steel spring coated with natural and artificial rubber were manufactured and tested on a shaking table to investigate the capacity of reducing the vertical vibration of a building induced by subway train. The model structure used in the test is a 1/4 scaled steel structure, and a white noise input and train vibration records were used to check the effectiveness of the isolators. According to the results all three types of isolators turned out to perform effectively in reducing the acceleration and the natural rubber-coated one is ranked best among the isolators. However the vertical displacement of the model is increased due to the installation of the bearings, and the safety against the lateral load induced by earthquake ground motion should be provided to be able to apply the system to the real buildings.

1. 서 론

지하철 운행에 의한 진동은 차량과 궤도 사이에서 발생하여 궤도 기초와 터널구조물을 통하여 지반에 전달되며 전달된 진동은 지반의 종류 및 깊이 등에 따라 인접한 건물 및 그 거주자에 다양한 영향을 미치게 된다. 특히 건물이 역사나 터널 상부에 건설되는 경우 지하철 진동이 지반에 의해 악화되지 않고 건물에 직접 전달되므로 더 큰 영향을 미칠 수

있다

지진과 달리 지하철 진동은 구조물에 대한 피해보다는 건물의 사용자들에게 불쾌감을 조성하거나 설비용 부품에 손상을 입히는 등 건물의 사용성을 저하시킨다. 또한 건물이 오랜 세월동안 지하철 진동을 받을 경우 피로현상에 의한 균열의 발생으로 건물의 수명이 단축될 수 있다.

지하철 진동에 의한 에너지는 지진에 비해 매우 적어 비교적 작은 지역에 영향을 미치며 진동원과 가까운 지역에서는 진동의 연직성분이 크나 진동원으로부터 멀어질수록 연직성분은 감소되고 수평성분의 진동이 주로 영향을 미치게 된다⁽¹⁾. 따라서 넓은 지역에 영향을 미치는 지진에 의한 진동은 수평

* 정회원, 삼성건설 기술연구소

** 삼성건설 기술연구소

*** 정회원, 유니슨산업 기술연구소

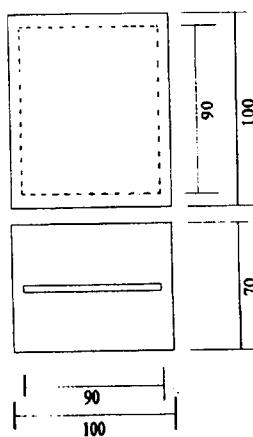
**** 정회원, 수원대학교 토목공학과

진동이 설계하중으로 작용하는 반면 진동원 주변의 구조물이 주 관심사인 지하철 진동의 경우 연직방향 성분이 중요한 요소가 된다.

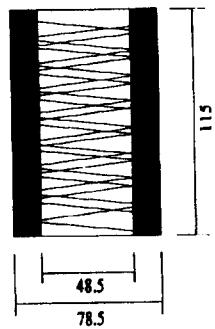
건물에 전달되는 지하철 진동의 진동수 성분은 보통 건물의 연직방향 고유진동수를 포함하거나 매우 가깝게 된다. 따라서 지하철 운행에 의한 진동의 수직성분은 건물의 고유진동수와 공진현상을 일으켜 증폭된 응답을 초래할 수 있다. 인간이 느낄 수 있고 건물과 상호작용을 일으키는 지하철 진동의 성분은 약 50Hz 이하이므로 이 범위내의 진동을 제어하는 것이 중요하다 할 수 있다⁽²⁾. 본 연구에서는 구조물의 강성을 필요이상으로 증대시키지 않고 구조물에 입사되는 진동을 제어할 수 있는 효율적인 기초진동절연장치를 개발하고 1/4로 축소된 철골 모형 구조물을 이용한 진동대 실험을 통하여 그 효과를 검증하였다.

2. 기초진동절연장치의 제작 및 물성실험

기초진동절연용 방진베어링은 기존의 적층고무받침 방식과 금속스프링에 에너지 소산 능력을 증가시키기 위해 고무를 피복 성형한 형태의 두 종류를 개발하였다. 고무는 일반적으로 금속에 비하여 내부 마찰이 매우 크므로 감쇠성이 양호하여 공진시 진폭을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있다⁽³⁾. 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 범용고무인 Natural Rubber(NR)와 합성고무인 Polynorbonene(PNR)을 사용하여 일반적인 적층고무받침 방식(rubber mount, RM)과 금속스프링에 고무를 피복 성형한 형태(NR, PNR)의 두 종류를 개발하였다. NR은 기계적 성질과 가공성이 우수



(a) Rubber mount



(b) NR and PNR rubber spring mount

Fig. 1 Shape and demension of isolation berings

하고 동적특성이 안정되며 반복하중에 의한 손실도 비교적 적은 장점이 있으나 용제나 윤활유에 침적되면 팽윤에 의한 물성저하가 크고 오존 등에 민감하게 반응한다. 최근에 개발된 PNR은 내식성이 우수하고 성분에 따라 감쇠성능을 광범위하게 조절할 수 있는 장점이 있다. 베어링의 크기 및 물성은 실험에 사용될 모형 구조물의 질량과 고유 진동수를 고려하

Rubber Mount (Ks = 101.7kg/mm, Range : 4 ~ 10mm)

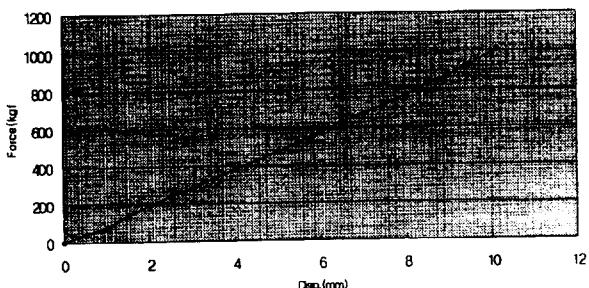


Fig. 2(a) Force-displacement relationship under static load (RM)

NR(Hardness:35, Ks=21.8Kg/mm, Range:20-25mm)

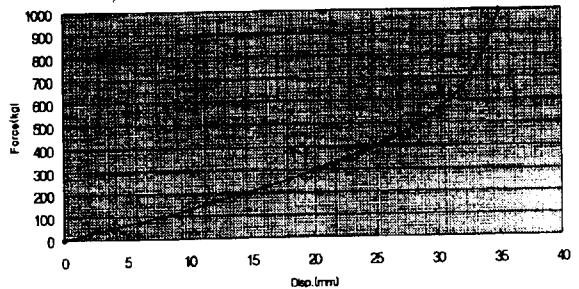


Fig. 2(b) Force-displacement relationship under static load (NM)

NR(Hardness:30, Ks=21.4Kg/mm, Range:20-25mm)

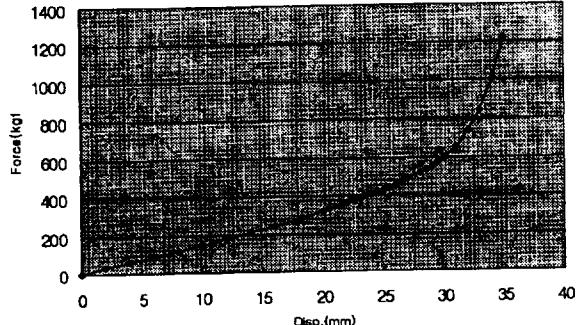


Fig. 2(c) Force-displacement relationship under static load (PNR)

여 제작되었다.

실험에 사용된 모델에 대한 고유치 해석결과 연직 방향 고유진동수가 3자유도계 시스템인 경우 최저 15Hz이고 1자유도계인 경우 32Hz 것으로 나타났는데 구조물과 공진현상을 일으키는 것을 방지하고

건물의 고유진동수에 근접한 입력진동성분을 차단하기 위해서 탄성받침의 고유진동수는 가능한 한 구조물의 진동수성분과 격리되도록 설계하였다. 적층탄성받침의 제작에 있어서는 고유진동수를 낮추기 위하여 고무 내부에 steel shim 1개를 삽입하였다.

적층 탄성받침은 원래 지진에 의한 수평진동을 줄이기 위한 용도로 이용되므로 본 연구에서는 금속스프링에 NR과 PNR을 피복 성형하여 금속스프링에 의해 고유진동수를 낮출 수 있는 장점과 고무의 에너지 소산 특성을 조합한 새로운 형태의 기초진동 절연장치를 제작하고 (Fig. 1(b)) 정적, 동적 특성 실험을 수행하였다. 정적 실험 결과는 Fig. 2에 나타나 있는데 변형이 커질수록 PNR이 NR에 비해 경화(strain hardening)되는 현상이 약간 큰 것을 볼 수 있다. 금속 스프링에 고무를 입힌 베어링은 RM베어링에 비해 수직강성이 작으므로 모형구조물의 각 기둥 하부에 두 개씩 설치하도록 설계하였다. 동적 특성실험은 각각의 베어링 4개를 1조로 하여 그위에 1.2 톤 강판을 올려놓고 modal test를 수행하였으며 전체 시스템의 고유진동수 및 감쇠비는 Table 1에 나타나 있다. 또한 Fig. 3은 각 베어링에 20Hz의 반복하중을 가하고 힘과 변위의 이력을 기록한 것으로 이력곡선 내의 면적으로 보아 PNR베어링의 감쇠성능이 가장 좋은 것을 알 수 있다.

3. 구조물 모델 실험

개발된 방진베어링의 성능을 검증하기 위하여 모형구조물의 하부에 방진베어링을 설치하고 뉴욕 주립대학에서 진동대를 이용한 구조물 모델실험을 수행

Fig. 3(a) Force-displacement relationship under cyclic load (Rubber Mount)

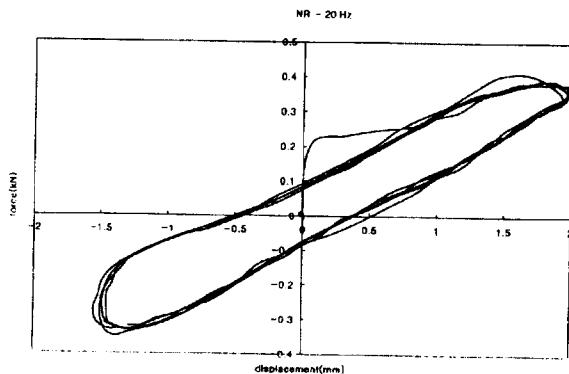


Fig. 3(b) Force-displacement relationship under cyclic load (NR)

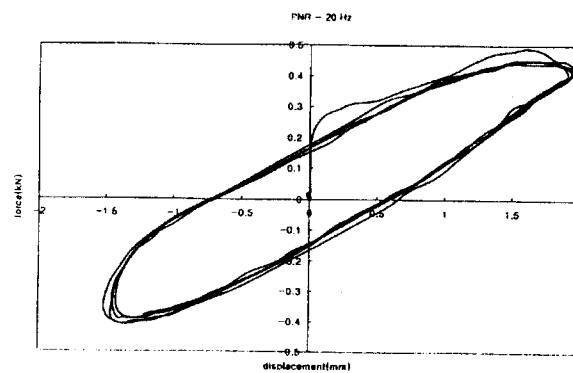


Fig. 3(c) Force-displacement relationship under cyclic load (PNR)

Table 1 Dynamic characteristics of bearings

기초분리 장치 Mode	적층탄성 받침	PNR-금 속스프링	NR-금속 스프링	금속 스프링	비 고
정적 스프링상수 (MN/m)	0.99666	0.20972	0.21364	0.07722 4	
1차 고유진동수	9.945Hz	8.293Hz	4.695Hz	3.73Hz	Heaving
Damping	4.567%	17.505%	5.802%	0.527%	
2차 고유진동수	1.169	3.864	1.215	1.061	Rolling
Damping	4.337%	-	-	0.313%	
3차 고유진동수	14.112Hz	-	-	5.28Hz	Pitching
Damping	4.79%	16.63%	5.172%	0.376%	
동배율					
고유진동수	16.093Hz	17.002Hz	7.563Hz	5.94Hz	
Damping	-	-	-	-	
동배율					

하였다. 모델하부에 설치한 방진베어링은 RM, NR, 그리고 PNR의 3가지 유형으로서 각 유형별로 실험을 수행하고 방진베어링을 장착하지 않은 모형구조물 실험결과와 비교, 분석하여 방진베어링의 성능을 검증하였다. 입력 진동데이터는 분당 서현역사에서 측정한 지하철 수직진동의 가속도 데이터를 이용하여 주파수특성과 크기를 변화시켜가면서 입력하였다.

3.1 모형구조물의 형상

모형구조물의 구조형식은 각 방향으로 1개의 경간과 3층으로 만들어진 철골 골조 형식으로 1/4 축소모델이다. 단면과 장면의 경간 길이비는 1:2이며 단면방향을 가새로 보강하여 2차원 평면골조로 거동하도록 하였다. 각층의 바닥은 거더 위에 슬라브의 역할을 하는 보를 배치함으로써 수평방향으로는 rigid-body 거동을 나타내고 수직방향으로는 거더의 수직변위를 어느정도 억제하는 역할을 하게 하였다. 고정하중의 효과 및 진동실험에서 질량효과를 주기 위하여 각층 바닥에 907kg의 철판을 올려놓고 거더위에 볼트를 이용하여 고정함으로써 모든 하중이 모델의 바닥에 집중되는 Lumped Model에 의한 동적해석이 가능하게 하였다. 모형구조물의 형상과 치수는 Fig. 4에 나타나 있으며 각 부재별 치수

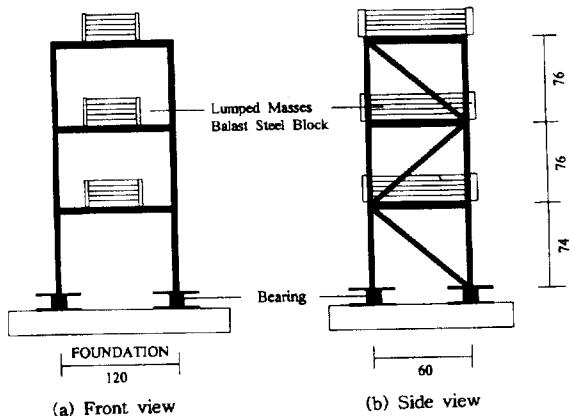


Fig. 4 Shape and dimension of model structure (3DOF)

Table 2 Schematic of model structure

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	

및 단면형상에 따른 단면적과 단면 2차 모멘트를 Table 2에 정리하였다.

3.2 가력 장치 및 측정방법

실험에 사용된 진동대 크기는 3.6m × 3.6m이며 수평방향으로 2대의 액추에이터와 수직방향으로는 진동대의 각 모서리에 1대씩 총 4대의 액추에이터가 설치되어 수평과 수직 그리고 회전이 가능한 3방향의 자유도를 구현할 수 있다. 진동대가 받을 수 있는 최대수직하중은 50톤이며 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 가진 주파수 범위는 50Hz이다.

모형구조물의 입력진동에 대한 응답을 측정하기 위하여 구조물의 각 부분에 총 10개의 가속도계와 4개의 변위계를 설치하였다. 모형구조물 하부에 직접적으로 작용하는 입력진동이력을 컴퓨터를 통해 액추에이터에 입력되는 진동데이터가 진동대를 거치면서 변화되는 것을 사용해야 하기 때문에 진동대 바닥위에 수직방향의 가속도계를 설치하였으며, 방진베어링의 바로 위에 수직가속도계를 설치하여 수직진동이 베어링을 통과하여 약화되는 현상을 볼 수 있도록 하였다. 각 층마다 가속도계를 설치하여 각 층의 가속도응답을 측정하였으며, 3층의 양단에는 수직가속계와 수직변위계를 설치하여 모형구조물의 rocking현상(좌우로 흔들리는 현상)을 측정하여 실험의 정확성을 기하였다. 또한, 진동대 바닥위에 수직방향의 변위계를 설치하고 3층에는 수평변위계를 설치하여 각 방향의 변위를 측정하였다. 가속도계와 변위계의 위치 및 방향은 Fig. 5에 나타나 있다.

가속도계와 변위계를 통하여 측정된 데이터는 64 Channel Switch Boxes, Data Logger와 Controller를 거쳐 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

3.3 실험 변수

(1) 방진베어링의 종류 및 설치유무

방진베어링을 설치하지 않고 모형구조물을 직접 진동대 위에 고정시켜 실험한 결과(FIX)와 세가지 유형의 방진 베어링(NR, PNR, RM)을 설치한 후 그위에 모형 구조물을 설치하여 실험한 결과를 비교하였다.

(2) 입력 진동 데이터

실험에 사용된 입력 지하철 진동 데이터는 지하철 분당선 서현역사의 터널상부에서 시간차를 두고 측

정한 4T와 8T의 두가지 진동성분을 사용하였다. 실질적으로 지하철 진동의 주파수 범위는 200Hz까지의 높은 진동수성분도 포함하고 있으며 중심주파수는 40Hz에서 70Hz사이에서 나타난다. 그러나 진동대의 가진주파수 범위가 50Hz까지만 표현가능하여 측정된 진동을 그대로 입력한 경우 응답이 거의 나타나지 않으므로 측정한 진동데이터의 형태(크기)는 그대로 두고 주파수축(x축)을 변화시켜 중심주파수가 35Hz와 17.5Hz 부근에서 나타나도록 하였다. 이러한 데이터의 변환은 지하철 진동이 지반과 건물의 기초 및 기둥을 통과하며 중심주파수가 저주파수 영역으로 이동하는 현상을 고려하고 실제보다 불리한 상황에 대한 방진베어링의 효용성을 검증할 수 있다는 점에서 의의를 찾을 수 있을 것이다. 중심주파수가 40Hz부근에서 나타나도록 조작한 입력을 4T4 또는 8T4라 명명하였으며 중심주파수가 20Hz정도인 입력을 4T2 또는 8T2라 부르기로 한다. 또한 각각의 입력진동의 크기를 두가지로 변화시켜가며 응답을 측정하였다. Fig. 6은 입력 지하철 진동의 스팩트럼을 나타낸다.

(3) 모형 구조물의 고유진동수

모형 구조물의 고유진동수를 변화시키는 방법으로는 구조물의 질량을 변화시키거나 강성을 변화시키는 두가지 방법이 있으나 실험여건상 강성의 변화에 의해 고유진동수를 변화시켰다. 기존의 3자유도 모형을 대상으로 실험을 한 후 강성을 증가시키기 위

해 2층과 3층에 X-자형 가새(brace)를 설치하여 1자유계 시스템으로 바꾸고 같은 실험을 반복하여 결과를 비교하였다.

3.4 실험 결과 및 분석

(1) 모형구조물의 고유진동수와 전달함수

방진베어링의 유무와 종류에 따라 각 모형구조물의 수직방향에 대한 백색파실험을 통하여 전달함수(Transfer Function)를 구하였으며(Fig. 7) 이를 토대로 얻어진 각 모형구조물에 대한 고유진동수는 Table 3에 나타나 있다. 모든 경우 베어링이 없을 때와 비교하여 모델의 고유주파수가 저주파수 영역으로 이동한 것을 볼 수 있다. 특히 방진베어링의 설치에 따라 수직방향 1차 모드의 고유진동수가 급격히 떨어졌으며 고차로 갈수록 떨어지는 비율이 낮아지는 현상이 나타났다.

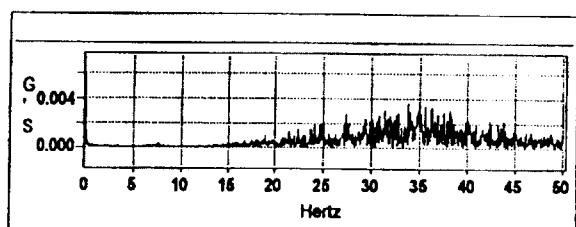


Fig. 6(a) Spectrum of subway train induced vibration (4T4)

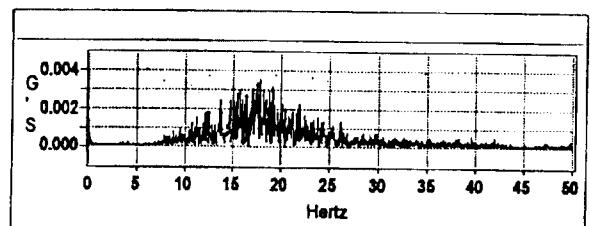


Fig. 6(b) Spectrum of subway train induced vibration (4T2)

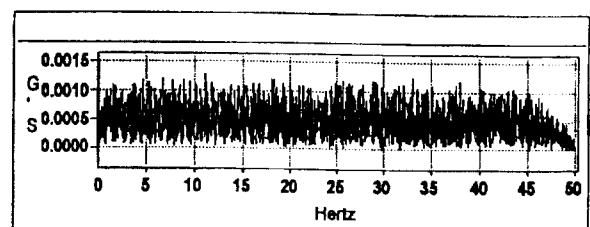
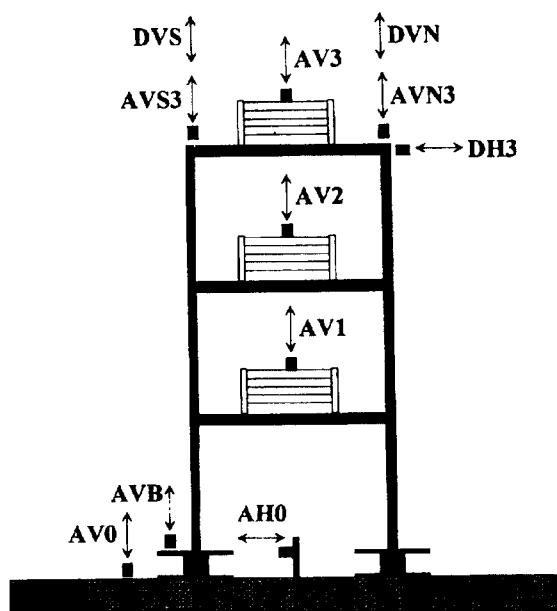


Fig. 6(c) Spectrum of white noise input vibration

Fig. 5 Location of accelerometers and LVDT's



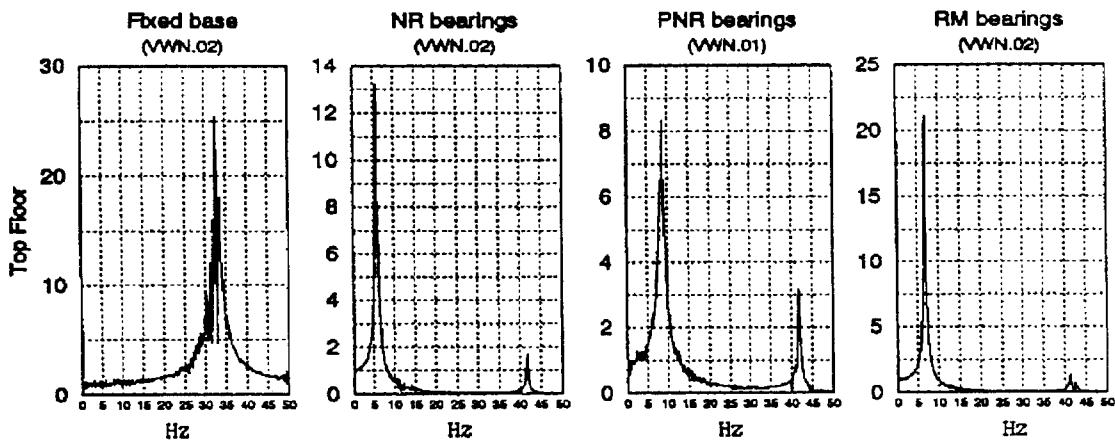


Fig. 7(a) Transfer function of model structure (1 DOF)

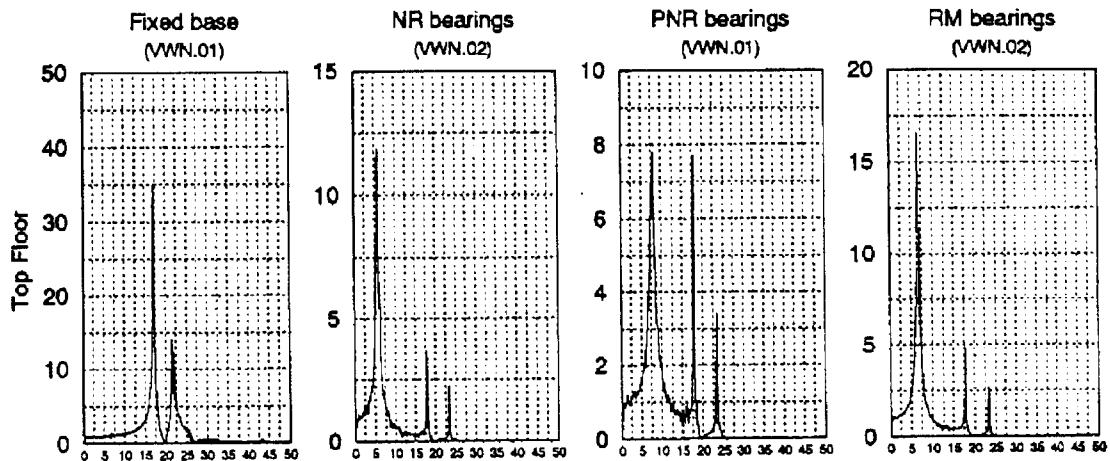


Fig. 7(b) Transfer function of model structure (3DOF)

이러한 현상은 베어링을 설치함으로써 베어링 자체의 진동모드가 1차모드가 되고 구조물 자체의 1, 2차 모드는 전체 시스템의 2, 3차 모드로 전이되기 때문에 추정되며 따라서 베어링이 구조물에 입사되는 진동을 효과적으로 흡수할 수 있을 것으로 판단된다. 전체적으로는 NR 방진베어링을 설치한 것이 제일 낮은 고유진동수를 보이고 있으나 그 차는

그리 크지 않다는 것을 알 수 있다. 구조물을 가새로 보강한 경우 수직방향의 고유진동수가 증가하였으나 베어링을 설치하면 고유진동수의 차이는 3DOF인 경우와 유사한 것을 볼 수 있다.

(2) 가속도 응답이력과 최대가속도

수직방향의 지하철진동에 대한 모형구조물의 응답은 각층에서 수직방향의 가속도센서와 변위계를 이용하여 측정하였다. 방진베어링을 설치하지 않은 경우 대부분의 응답가속도가 바닥에서의 최대가속도인 AV0보다 크게 나왔으며 3층에서의 응답가속도가 전반적으로 제일 큰 경향을 띠고 있다. Fig. 8은 구조물 하부에 NR베어링을 설치한 경우 바닥에서 측정된 가속도와 최상부에서 측정된 가속도의 시간이력과 스펙트럼을 비교한 것으로 베어링에 의해 가속도의 절대값이 대폭 감소한 것을 볼 수 있다. 여기

Table 3 Natural frequency of model structure

TYPE	수직방향 고유진동수(Hz)			
	3DOF		1DOF	
	1차	2차	3차	1차
FIX	17.0	21.5	26.5	32.4
NR	5.5	17.6	23.5	5.5
PNR	7.6	17.6	23.5	9.0
RM	6.9	17.5	23.3	6.5

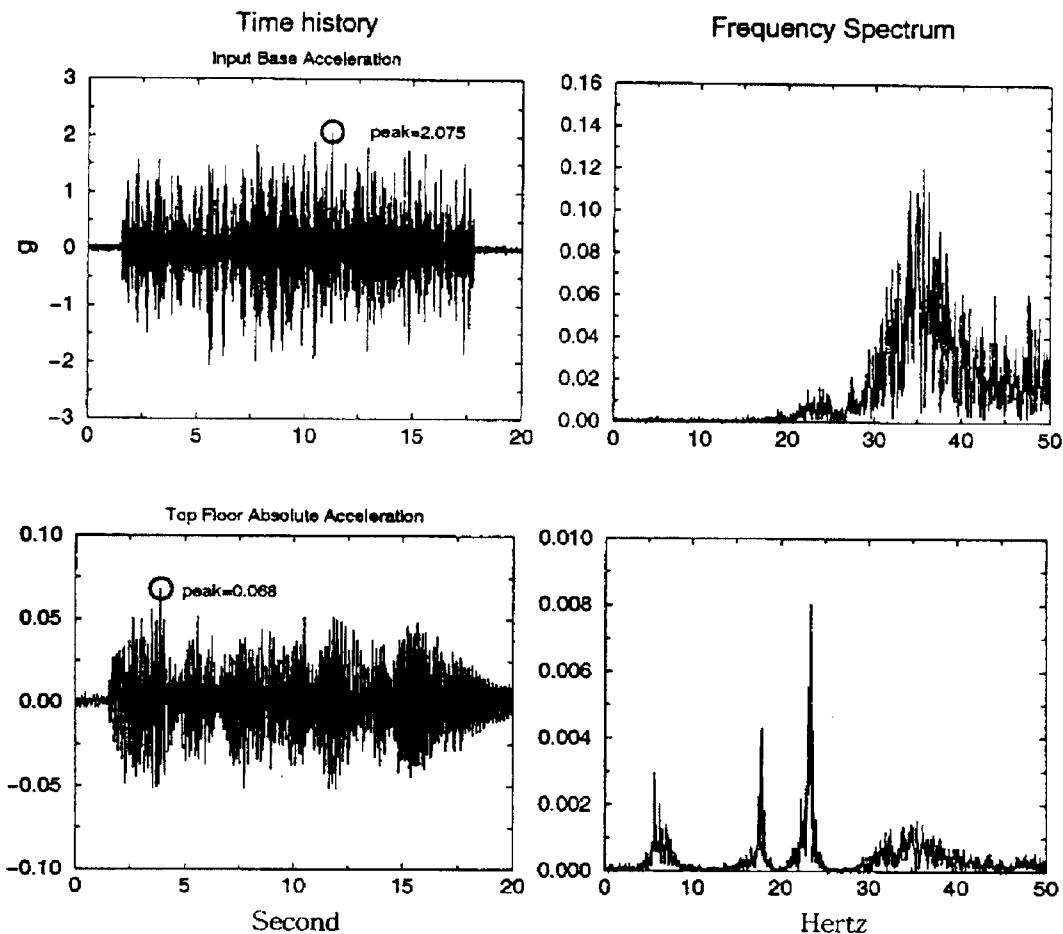


Fig. 8 Acceleration records measured on the base on top floor induced by the input vibration 4T4

서 스펙트럼의 크기는 가속도와 같이 중력가속도 g 의 단위로 표시하였다.

방진베어링이 설치된 3DOF 구조물에 중심주파수가 17.5Hz 근처에 나타나는 입력진동 T2 진동이 작용할 경우 중심주파수가 35Hz 근처에 있는 T4가 작용할 경우보다 응답 가속도가 대체적으로 크게 나왔으며, 1DOF 구조물인 경우 T4가 작용할 때 크게 나왔다. 이러한 현상은 T2진동의 경우 그 중심주파수가 3DOF시스템의 1차 고유진동수에 근접하기 때문이며, T4입력이 작용할 때 1DOF시스템의 응답이 커지는 것도 같은 맥락에서 설명할 수 있다. 또한 3DOF 시스템에 T2가 작용할 때 1층보다 2층, 2층보다 3층의 가속도가 크게 나타나고 T4진동에 대해서는 그 반대 현상이 나타남을 발견하였다.

입력진동의 최대가속도의 크기가 일정하지 않기 때문에 방진베어링의 성능을 비교하기 위해 입력진동의 최대가속도(AV0)에 대한 최고층의 최대가속도(AV3)의 비율을 구하였으며 이에 대한 결과는

Table 4에 나타나 있다. 3DOF시스템에 있어 AV0에 대하여 AV3는 NR인 경우 96.6%, PNR인 경우 94.7%, 그리고 RM인 경우 93%의 가속도 저감효과가 있었다. 1DOF시스템의 경우도 거의 동일 하며 그 저감비율은 각각 95.5%(NR), 90.5% (PNR), 94.9% (RM)이다. 이러한 경향은 평균가속도의 비교에서도 잘 드러나는 것을 알 수 있다. 평균응답 가속도에서도 NR베어링의 저감효과가 가장 높게 나타났으며 PNR과 RM의 순으로 효과가 좋았다. 3DOF의 경우도 마찬가지로 NR, PNR, RM의 효과는 각각 85.5%, 80.7%, 79.7%로 확인 되었다. 방진베어링을 설치하였을 때 가속도의 저감에 큰 효과가 있는 반면 건물의 저면에 유연도(flexibility)가 증가함으로 인하여 수직변위는 증가하게 된다. Table 5는 바닥과 최상층의 최대 상대변위를 나타내며 1DOF시스템에 있어 3층에서 변위의 평균 증가율은 각각 300%(NR), 220% (PNR),

Table 4(a) Maximum acceleration response ratio (1DOF)

Input	AV3/AVO			
	Fixed	NR	PNR	RM
4T4.01	2.62	0.17	0.34	0.19
4T4.02	2.61	0.15	0.30	0.20
4T2.01	1.72	0.16	0.36	0.23
4T2.02	1.63	0.15	0.33	0.20
8T4.01	2.74	0.12	0.26	0.14
8T4.02	2.38	0.13	0.23	0.17
8T2.01	1.97	0.15	0.36	0.19
8T2.02	1.59	0.15	0.29	0.19
VWN.01	2.02	0.58	0.67	0.57
VWN.02	1.93	0.48	0.63	0.61

Table 4(b) Maximum acceleration response ratio (3DOF)

Input	AV3/AVO			
	Fixed	NR	PNR	RM
4T4.01	0.58	0.02	0.04	0.09
4T4.02	0.64	0.03	0.04	0.08
4T2.01	2.86	0.26	0.29	0.41
4T2.02	3.46	0.27	0.36	0.47
8T4.01	0.51	0.02	0.03	0.04
8T4.02	0.57	0.02	0.03	0.04
8T2.01	2.33	0.24	0.42	0.42
8T2.02	2.29	0.23	0.41	0.47
VWN.01	1.31	1.00	0.19	0.64
VWN.02	0.61	0.24	0.20	0.61

307%(RM)로 나타났으며 3DOF인 경우 각각 220% (NR), 167% (PNR), 280% (RM)에 해당하는 변위의 증가가 관찰되었다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.
구조물 하부에 설치된 방진베어링에 의해 고유진동 수가 저주파수 영역으로 이동하게 되어 주로 고주파수 성분이 주성분인 지하철 진동을 효율적으로 저감 할 수 있다.

베어링을 장치하지 않았을 경우와 비교하면 세 종류의 베어링 모두 건물에 전달되는 지반 가속도를 저감하는데 효과가 있는 것으로 판명되었으며 그중에서도 NR베어링이 가장 효과적이나 그 차이는 그리 크지 않았다.

방진베어링에 의하여 수직진동량은 크게 증가하며 이러한 현상은 PNR의 경우 가장 적게 나타났다.
스프링에 고무를 피복하여 고유진동수를 낮추고 감쇠비를 높인 형태의 기초진동절연장치는 기존의 적층 고무베어링과 비교할 때 수직진동 제어에 대하여

Table 5(a) Maximum relative displacement (1DOF)

Input	DV3-DVO (in)			
	Fixed	NR	PNR	RM
4T2.01	0.004	0.008	0.009	0.024
4T2.02	0.007	0.016	0.016	0.035
4T4.01	0.012	0.023	0.028	0.025
4T4.02	0.031	0.047	0.050	0.044
8T2.01	0.004	0.007	0.009	0.009
8T2.02	0.006	0.014	0.014	0.018
8T4.01	0.012	0.015	0.026	0.021
8T4.02	0.032	0.030	0.051	0.040
VWN.01	0.008	0.029	0.020	0.033
VWN.02	0.013	0.064	0.034	0.088

Table 5(b) Maximum relative displacement (3DOF)

Input	DV3-DVO (in)			
	Fixed	NR	PNR	RM
4T2.01	0.005	0.007	0.005	0.019
4T2.02	0.010	0.009	0.007	0.030
4T4.01	0.005	0.017	0.012	0.027
4T4.02	0.025	0.035	0.007	0.052
8T2.01	0.005	0.009	0.007	0.009
8T2.02	0.013	0.011	0.011	0.022
8T4.01	0.009	0.014	0.010	0.020
8T4.02	0.021	0.029	0.020	0.038
VWN.01	0.013	0.000	0.016	0.032
VWN.02	0.013	0.037	0.031	0.061

장점이 있는 것으로 평가되며 스프링의 강성, 고무의 성질, 강성 및 감쇠비 등의 효과적인 조합과 각 재료의 성능개발을 통하여 더욱 효과적인 시스템으로 발전시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 베어링을 설치할 경우 연직방향 변위가 증가하고 지진하중과 같은 횡력에 대하여 취약한 점이 있으므로 이 분야에 대한 보완연구가 필요하다. 수직변위와 횡력에 대한 안전성 및 시공성이 확보된다면 이와 같은 방진베어링의 사용으로 지하철 진동에 대한 거주성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) “고속철도 환경소음기준 및 진동기준에 대한 연구”, 한국고속철도건설공단, 1995
- (2) “지하철 5,7,8호선 패도공사 시공감리용역 과업수행보고서”, 서울특별시 지하철건설본부, 1994
- (3) Newland, D.E. and Hunt, H.E., 1991. “Isolation of Buildings from Ground Vibration: a Review of Recent Progress”, IMechE, Vol. 205.