

실험적 기법을 이용한 대형구조물 교통진동 차진기술 개발

A Development of Vibration Isolation Technology for a Large Structure using Experimental Research

류봉조† · 이흥기* · 손성완* · 이규섭** · 한현희**
 B. J. Ryu, H. G. Lee, S. W. Son, G. S. Leer and H. H. Han

Key Words : Vibration Isolation Technology(차진 기술), Large Structure(대형 구조물), Transmissibility(전달율), Tire-Isolator(타이어-방진재)

ABSTRACT

This paper deals with the vibration isolation techniques for a large structure using experimental research. In the case of vibration isolation for the vicinity of a subway or a railroad station, most of vibration isolation techniques using isolation materials with high isolation efficiency only, have been applied. Therefore, the quantitative evaluation and design technologies are required for a vibration isolation of large structures. In this study, firstly, vibration characteristics due to train or subway are analyzed. Secondly, the performance of existing vibration isolation materials such as precision isolation material, elastomer is estimated through the experiments. Thirdly the performance of tire isolation material and its frame is tested and evaluated.

1. 서론

최근 도심지의 지하철 및 경전철 건설의 증가에 따라 철도 차량에 의한 진동으로 인접한 공동 주택 및 대형 건축물에 거주하는 주민들의 민원이 증가되고 있기 때문에 기존의 철도가 운행되고 있는 구간에 주거지가 개발될 경우, 건물에 대한 최적의 방진대책이 필요하다.

철도 진동은 궤도에서 발생된 진동이 지반을 통하여 수진 구조물인 주민 거주 구조물에 전파되고, 따라서 철도 주변의 방진 대책은 크게 궤도, 지반, 수진 구조물의 측면으로 나누어 생각 할 수 있는데, 일반적으로 거주지역을 철도가 통과 할 경우 진동원 대책인 궤도 방진대책이 가장 효율적인 방법으로 알려져 있다.

그러나, 최근 도심의 주민의 유입에 의하여 도심의 확장 등으로 기존의 철도가 운행하고 있는 도심 외곽 지역이 주민 거주지로 개발되는 경우 궤도 방진대책은 불가능하게 되어 이러한 지역에 지하철 운행 구간과 인접하여 건물을 신축 할 경우 최적의 방진대책 수립이 필요하다고 본다.

현재 건설 현장에서 이러한 철도 및 지하철 인접 지역의 방진 대책의 경우 지반의 진동 전파 특성 및 경로 등을 고

려하지 않고 일반적인 방진재의 방진 효율을 가지고 예측한 정성적인 방법을 통하여 고가의 방진재를 선정, 적용시킴으로써 그 방진 및 방음 성능과 관련한 정량적인 평가 및 방진재 사용과 적용에 관련한 설계 기술이 거의 없는 상태이므로, 실험적이고 실증적인 엔지니어링 방법을 통하여 대형 구조물의 교통 진동 소음 차단을 위한 방진재 설계기술의 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

철도와 같은 교통진동원에 대한 인접 구조물의 차진 시스템의 제작/설계 기술은 도심지의 대중 교통수단으로 널리 이용되고 있는 독일, 프랑스와 같은 서유럽 국가에서 세계 시장을 선도하고 있으나 이러한 국가에서는 주거 구조물이 통상 저층 구조로서 현재 우리나라의 대형 주거 구조물에 차진 시스템에 적용하기는 다소 어려운 실정이다. 반면에 일본의 경우는 주로 지진 등의 피해에 대비하기 위하여 대형 구조물에 대한 면진 및 제진 시스템의 개발과 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 상당히 고가의 시스템으로 적용하기에 어려움이 있다.

현재 국내에서는 내진 설계 규정의 신설로 인하여 대형 구조물에 대한 내진설계를 의무화하고 있으나 지상 및 지하의 철도 주변의 인접 구조물에 대해서는 철도와의 이격거리, 구조물의 특성에 대하여 방진 관련한 구체적인 설계 기준이 없으며 다만 민원 발생의 줄이기 위하여 철도 관리 공단에서 철도 및 지하철 운행 구간과 근접하여 건물을 신축 할 경우 모든 소음 진동 민원에 대하여 시공사가 책임지고 대책을 강구 할 것을 요구하고 있는 실정이다.

또한, 국내 건설사가 철도 및 지하철 인접하여 주거 구조

† 한밭대학교 기계공학부
 E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr
 Tel : (042) 821-1159, Fax : (042) 821-1587

* 알엠에스테크놀로지(주)

** (주)텍트리

물을 시공하는 경우 국내 방진 업체에서 제시하고 있는 일반적인 구조물 방진 소자를 건물 기초 또는 건물 외벽 등에 설치하여 구조물과 지반을 격리시킴으로서 방진을 수행하고 있다.

현재 국내에서 몇몇 방진업체에서 구조물 격리제 및 지반 진동 차단재 등의 철도 및 교통 진동을 차진 시킬 수 있는 제품이 생산되고 있으나, 실제 지하철 운행 상태에서 설치 전과 설치후의 정량적인 효율 및 구체적인 건물 용도나 특성에 따른 설계 기술을 보유하고 있지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문의 목적은 첫째, 철도 차량 진동의 특성 및 경로에 따른 진동 특성을 분석하고, 둘째, 동적실험을 통해 기존 사용하고 있는 고가의 정밀방진제품이나 고무 방진제품의 성능을 평가하고, 이를 대체하기 위한 패-타이어 방진재의 성능을 시험함으로써 대형구조물의 교통진동 차진을 위한 설계를 하는데 있다.

2. 본 론

2.1 실측자료에 의한 지하철 진동 특성

Table 1. Vibration signal values measured at station A.

측정값 측정위치	지배 주파수 (Hz)	Peak value (gal)	Over All (gal)	dB	dB(V)
①침목 위	105.0	527.94	2630.49	128.4	101.00
②자갈도상 바닥	76.9	14.149	97.56	99.79	76.52
③터널상부벽 2m	256.3	3.513	26.92	88.60	61.87

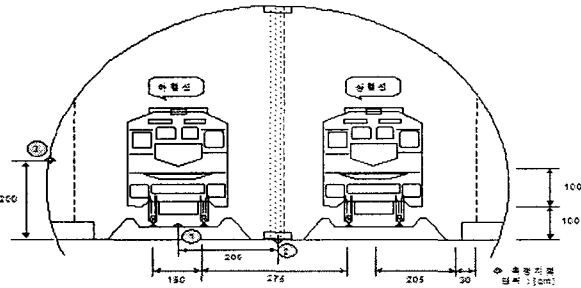


Fig. 1 Measuring positions of vibration signals at station A.

Table 1과 Table 2, Fig. 1과 Fig. 2는 각각 서로 다른 A, B 두 역사에 있어, 지하철 차량의 근접 거리에서 측정된 진동 측정값들과 측정 위치들을 나타낸다. 일반적으로 철도 차량의 진동은 지배적인 주파수가 40~100Hz사이인 것으로 알려지고 있으나, 강성이 큰 터널 상부 벽에서는 매우 높은 주파수에서 나타나고 있다.

Table 2. Vibration signal values measured at station B.

측정값 측정위치	지배 주파수 (Hz)	Peak value (gal)	Over All (gal)	dB	dB(V)
①침목 위	412.5	440.620	2932.484	129.34	78.62
②콘크리트 바닥	486.8	3.136	30.236	89.61	80.26
③터널벽 2.4m	144.4	1.677	14.179	83.03	44.73
④환풍구 쪽 9.7m	102.5	0.287	1.438	63.15	24.07

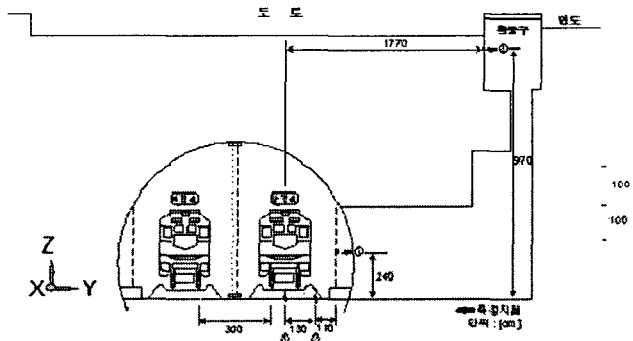


Fig. 2 Measuring positions of vibration signals at station B.

침목 위에서의 진동 레벨은 비슷한 것으로 나타났으며, 콘크리트 바닥과 같이 강성이 큰 경우에는 지배주파수가 높으며, 고주파일수록 감쇠정수가 높아 전파 과정에서 급속히 감쇠하므로 영향이 적다.

진동의 전파과정에서 감쇠되는 양은 식 (1)이 일반적으로 사용된다.

$$VL_r = VL_o - 8.7\lambda(r-r_o) - 20 \cdot n \cdot \log(r/r_o) \text{ dB} \quad (1)$$

여기서, VL_o 는 진동원에서 r_o (m) 떨어진 지점의 진동 레벨(dB), VL_r 은 진동원에서 r (m) 떨어진 지점의 진동 레벨(dB), λ 는 지반전파의 감쇠정수($\lambda = 2\pi hf/V_s$), V_s 는 횡파 전파속도 (m/sec), n 은 실체파 1, 표면파 1/2, h 는 감쇠정수를 나타낸다.

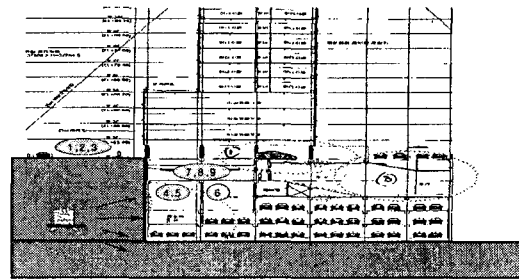


Fig. 3 Measuring positions at roads and inner parts of buildings near subway train.

Fig. 3은 지하철 인근의 도로와 건물 내부에서 지하철 운행에 따른 진동 신호를 측정한 측정위치를 나타내며, Fig. 4와 Fig. 5는 각각 Fig. 3의 측정위치 1(도로면)과 측정위치 7(건물 지하 바닥)에서의 진동 가속도 레벨을 시간 영역과 진동수 영역에서 나타낸 그림들이다.

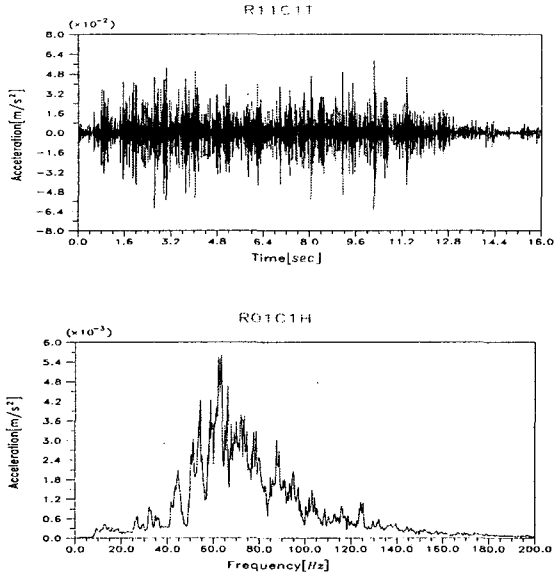


Fig. 4 Acceleration levels of subway train vibrations in the time and frequency domain at position 1.

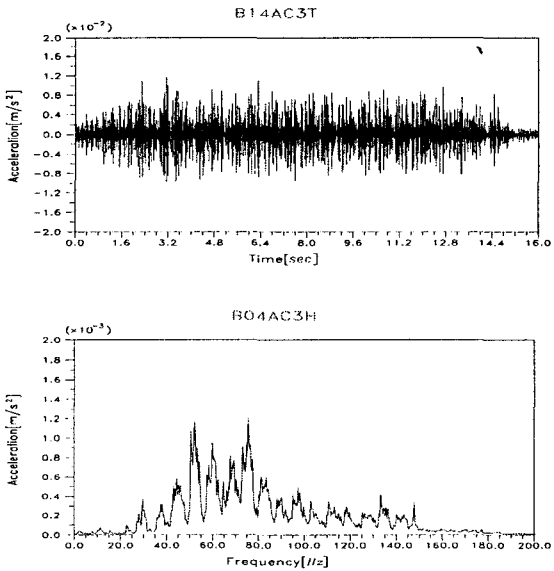


Fig. 5 Acceleration levels of subway train vibrations in the time and frequency domain at position 7.

Fig. 4와 Fig. 5에서 살펴본 바와 같이 도로면(측정위치 1)에서의 진동보다 건물 지하 바닥(측정위치 7)에서의 진동이 크게 감소된 것을 알 수 있다. 이것은 건물 벽 사이의

간격 등이 일부 방진구 역할을 하여 경로 감쇠가 크게 발생한 것으로 판단된다.

이 계측 결과에서 중요한 사실은 수진점에 도달한 지하철 진동의 주파수 특성은 알려진 바와 같이 40~100Hz 사이에 주로 존재한다는 것이다. 이는 방진재의 선정과 설계에 있어, 이 주파수 대역을 고려하여 설계하여야 한다는 것을 의미한다.

2.2 폐-타이어를 이용한 방진재 설계

폐 타이어를 방진재로 활용하고자 하는 발상은 유럽의 저층 구조 주택에서 내진을 위해 사용하고 있는 방진재의 구조가 이와 유사한 것에서 도출되었다. 폐 타이어를 활용함으로써 상대적으로 저가의 방진재를 제작할 수 있다는 점에서 장점을 지니고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 기존의 고무 방진재(elastomer)와 폐-타이어 방진재의 고무 특성을 나타낸 그림이다.

기존의 고무 방진재의 스프링 특성은 비선형성이 매우 커서 방진 효율이 잘 나오지 않는 경우가 대부분이다. 반면에 폐-타이어 방진재는 선형적인 특성을 가지고 있어 방진 효율이 높을 것으로 예상된다. 또한, 단위 면적 당 강성이 적기 때문에 넓은 지역에 고르게 분포시킴으로써 틸팅(tilting)과 같은 회전모드를 저감시킬 수 있어 매우 효과적인 방진재로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

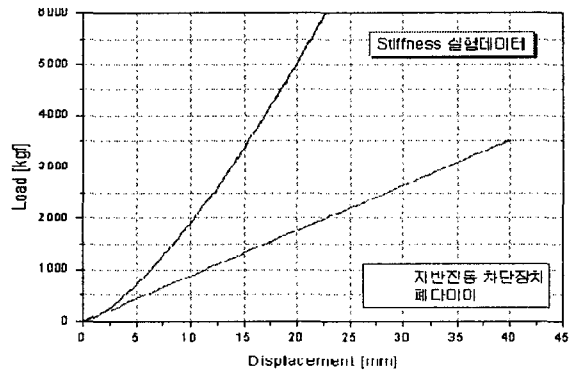


Fig. 6 Comparison of characteristics between elastomer and tire isolator

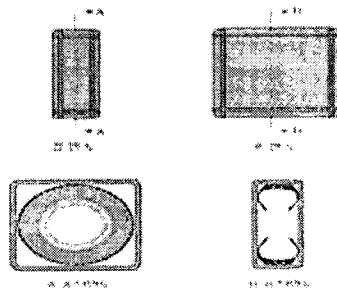


Fig. 7 Schematic diagram for tire isolator.

페-타이어를 방진재로 사용하는 경우, 실제 제품화 시에는 Fig. 7과 같이 고 감쇠특성을 갖는 합성고무를 입혀 외부 도사의 유입을 막도록 설계해야 할 것이다.

2.3 페-타이어 외부 틀의 감쇠특성 시험 및 결과

페 타이어 방진재의 외부 틀로 사용하는 합성고무는 기계적 성질, 내 환경성 등을 고려하여 일반적으로 방진재로 많이 사용되는 크로로프렌 고무(CR), 니트릴 고무(NBR) 및 우레탄 고무(UR) 등을 선택할 수 있으나, 감쇠특성이 우수한 것으로 선택하기 위하여 감쇠특성 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 시편은 Table 3과 같다.

Table 3 Specification of rubber types for damping materials

시편 종류	고무 계열	고무 경도	시편 모델명
Type A	클로로프렌 고무(CR)	40	Model A-1
		60	Model A-2
Type B	니트릴 고무(NBR)	40	Model B-1
		60	Model B-2
Type C	우레탄 고무(UR)	40	Model C-1
		60	Model C-2

감쇠재 물성치 시험에 대하여 KS 규격에서는 공진법과 비공진법으로 구분하여 제시하고 있지만 철도 진동의 주파수 범위에 적절하지 못하여 ASTM에서 제시하고 있는 방법을 사용하였다.

시험은 그림 15와 같은 beam 시편에 고무 시편을 접착한 후 가진하여 감쇠특성을 도출한다. 적용 주파수를 고려하여 계의 1차 고유진동수가 20 Hz 미만인 되도록 보의 구조가 설계되었다.

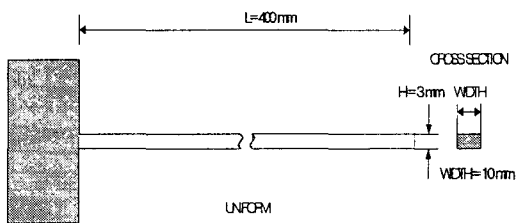


Fig. 8 Specimen of modal testing.

시험은 충격해머에 의한 모달 테스트를 수행하여 각 공진점에서의 최고점(peak point)에서 3dB 하단을 가로로 끊었을 때 주파수 폭 $\Delta\omega$ 와 고유진동수 ω_n 을 이용하여 감쇠계수 η 는 식 (2)의 관계로 구한다.

$$\eta = \Delta\omega / \omega_n \quad (2)$$

Fig. 9는 모달 테스트를 위한 시험장치 구성도를 보여준다.

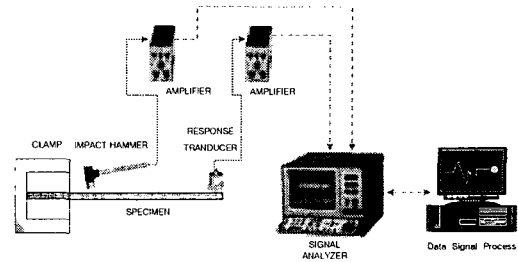
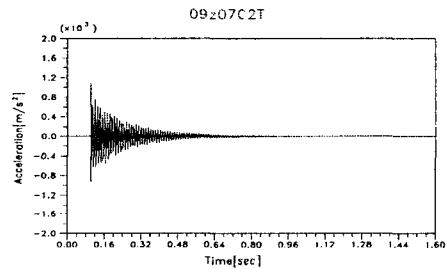


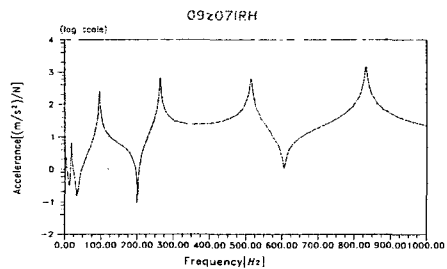
Fig. 9 Experimental setup for modal testing.

시험 결과는 시편 종류 3종류, 고무경도에 따른 3종류로 모두 6종에 대한 결과를 얻었지만, 본 논문에서는 Type A의 경우는 CR-40, Type B의 경우는 NBR-60, Type C의 경우는 UR-60의 시험결과만을 싣는다.

Fig. 10부터 Fig. 12와 Table 4부터 Table 6은 이들 재질의 각각에 대한 시간이력 그래프, 주파수 응답 그래프, 감쇠특성을 보여준다. 실험결과들로부터 전반적으로 사용 주파수 범위인 40~100Hz 범위에서 감쇠특성이 가장 좋은 것은 시편 Type B-2인 경도 60의 NBR 고무인 것으로 판단되었다.



(a) Time response

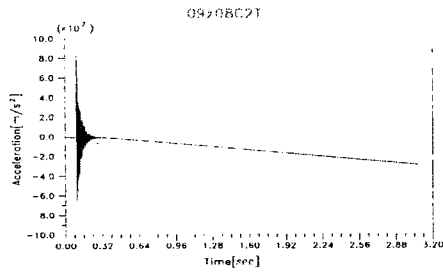


(b) Frequency response

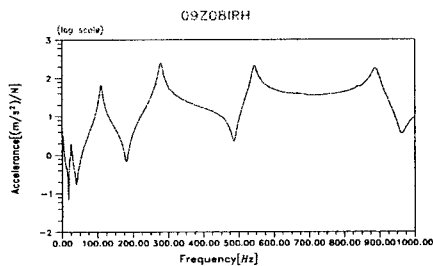
Fig. 10 Responses of type A-1 for modal testing.

Table 4 Measured values of type A-1

Type	시편	Mode No.	Damped Natural Frequency [Hz]	Frequency Bandwidth ($\Delta\omega$)	Loss Factor [η]
A-1	CR-40	1	16.86	0.55	0.03240
		2	93.22	0.82	0.00873
		3	254.71	1.04	0.00407
		4	491.16	6.96	0.01420
		5	818.97	5.64	0.00689



(a) Time response

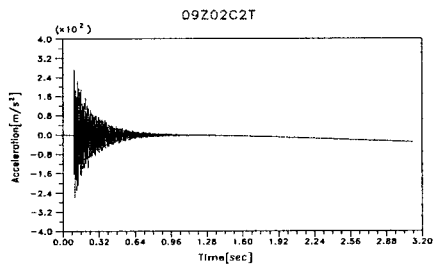


(b) Frequency response

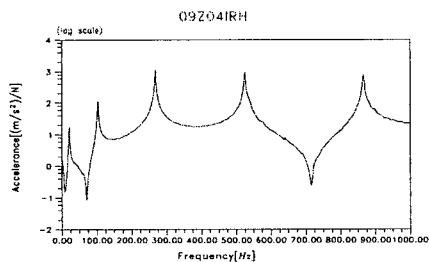
Fig. 11 Responses of type B-2 for modal testing.

Table 5 Measured values of type B-2

Type	시원	Mode No.	Damped Natural Frequency [Hz]	Frequency Bandwidth [$\Delta\omega$]	Loss Factor [η]
B-2	NBR-60	1	23.44	1.91	0.08110
		2	105.86	3.05	0.02880
		3	274.75	4.45	0.01620
		4	524.47	6.64	0.01270
		5	864.23	8.60	0.00995



(a) Time response



(b) Frequency response

Fig. 12 Responses of type C-2 for modal testing.

Table 6 Measured values of type C-2

Type	시원	Mode No.	Damped Natural Frequency [Hz]	Frequency Bandwidth [$\Delta\omega$]	Loss Factor [η]
C-2	UR-60	1	20.19	0.48	0.0240
		2	98.29	0.76	0.0078
		3	262.27	0.90	0.0035
		4	504.78	7.19	0.0142
		5	835.49	2.41	0.0029

2.4 방진재 방진성능 평가 시험 및 결과

방진 성능의 비교평가 시험을 위하여 철도 진동원을 상사하기 위한 가진기와 실제 건축 구조물에 방진 설치를 하는 경우, 각 방진재에 작용하는 정하중을 고려한 dummy 질량을 제작하여 기존 사용하고 있는 정밀 방진재, 고무 방진재와 페-타이어 방진재의 3종류를 비교 시험하였다.

성능평가는 방진대 하단의 지반진동의 가속도 크기와 방진대 위의 진동의 가속도 크기의 비를 전달률로 산정하여 전달률(transmissibility) 곡선을 구하여 평가하였다.

시험에 사용된 가진기는 2개의 모터에 의한 불균형 원심력으로 지반을 가진하며, 가진 주파수는 가진기 제어기에서 제어하게 된다. 시험은 가진 주파수를 점차로 증가시켜가며 가진하는 sweep 방식으로 하였다. Photo. 1에서 Photo. 3은 각각 정밀방진재, 기존 고무방진재, 페-타이어 방진재에 대한 방진 성능시험 광경을 보여준다.

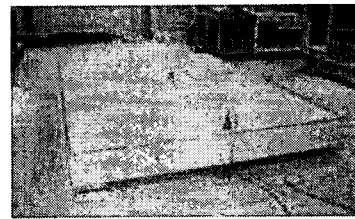


Photo. 1 Photograph of precision isolator.



Photo. 2 Photograph of elastomer isolator.

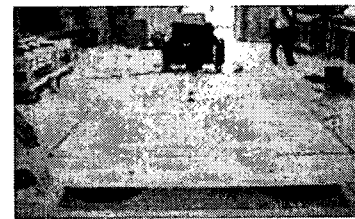


Photo. 3 Photograph of tire isolator.

비교성능 평가시험 결과 측정된 전달률 함수는 Fig. 13과 같다.

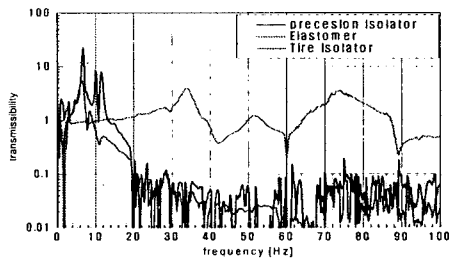


Fig. 13 Transmissibility for three-types of isolator.

전달률 함수를 비교해 보면 정밀 방진재와 페-타이어 방진재의 경우 20~100 Hz 구간에서 전달률이 0.1 미만으로 진동의 90% 이상이 차단되고 있음을 알 수 있다.

이 두가지 방진재는 공히 공진점이 6.5Hz 부근으로 나타나고 있으며, peak점의 크기가 페-타이어를 쓴 경우 작게 나타나는 것은 감쇠특성이 우수하다는 것을 의미한다. 특히 10Hz 부근의 tiling 모드도 적게 나타남을 알 수 있다. 반면에 고무 방진재를 사용한 경우는 공진점이 34Hz 부근으로 높게 나타났으며 전달률이 1이상인 영역이 많아 진동 절연 효과는 전혀 없는 것으로 판단된다.

Fig. 14~Fig. 16은 바닥진동과 방진재 위에서의 진동을 시간 축에서 비교한 것이다. 가진 주파수는 19Hz 부근으로 Fig. 13을 참고하면, 정밀 방진재에서는 전달률이 0.5 부근, 타이어 방진재에서는 0.3 부근, 고무 방진재의 경우 1이 조금 넘는 것으로 나타나 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

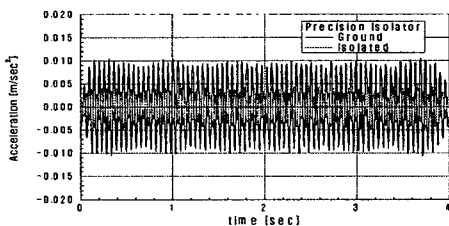


Fig. 14 Comparison precision isolator with ground for vibration accelerations(near 19Hz).

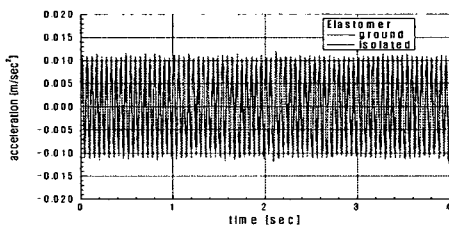


Fig. 15 Comparison elastomer isolator with ground for vibration accelerations(near 19Hz).

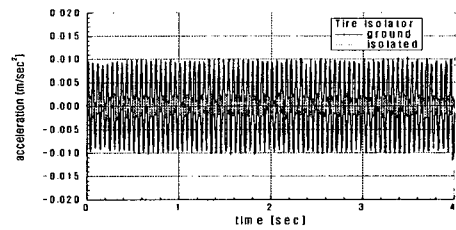


Fig. 16 Comparison tire isolator with ground for vibration accelerations(near 19Hz).

4. 결론

본 연구를 통하여, 첫째, 철도 차량의 진동원에 대한 어느 정도의 데이터베이스 수립이 이루어짐으로써, 이 분야의 방진설계에 많은 활용이 가능하다고 판단된다.

둘째, 페-타이어를 이용하는 방진재는 4~5층 구조의 건축물 방진에 적합할 것으로 판단되며, 타이어를 넓게 분포 시킴으로써 높은 방진효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 이를 그대로 사용하는 것이 아니라 케이스에 해당되는 재질은 NBR-60계열을 사용하면 좋을 것으로 판단된다.

셋째, 진동원, 경로 및 수신점에서의 진동대책을 포함한 방진재설계 및 개발과정을 수행함으로써 유사 개발과정에도 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2005년도 산학협력중심대학사업 2차년도 기술개발과제 지원 및 수행결과의 일부이며, 지원을 아끼지 않으신 관계기관에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 한국소음진동공학회, 1995, 소음 진동 편람, 한국소음진동공학회.
- (2) Warring, R. H., 1983, Handbook of Noise and Vibration Control(5th Edition), Trade & Technical Press LTD.
- (3) Engineering Manual & Design Guide, 2001, Firestone Inc.
- (4) D'Uron, Z. H., Rubin, S. and Ozisik, H., 1998, "Condition Assessment of Large Structure", Sound and Vibration/August
- (5) 이흥기 등, 2000, "철도소음진동의 효율적 저감방안 연구(진동편)", 유니슨기술연구소.