

열차 진동 저감을 위한 마찰썰기형 방진장치의 거동 시험

A Behavior Test on a Frictional-Wedge-Type Vibration Isolation Device for Vibration Reduction of a Railway Track

Chanyoung Lee^{a,1}, Sanghyun Choi^b, Yoojin Lee^a, Segon Kwon^c, Yongsung Koh^a, Yongsoo Ji^{a*}

^a Department of R&D Center, ESCO RTS Co.,Ltd, Doosan Venture Digm 516, 415 Heungan-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, 413-755, Republic of Korea

^b Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 437-763, Republic of Korea

^c Technology Research Department, KORAIL Research Institute, 240, Jungangro, Dong-gu, Daejeon City, 300-720, Republic of Korea

ABSTRACT

In the case of railway facilities in cities such as a railway station or a bridge, the significance of design for reducing vibration and noise is getting more significant. The vibration control solution is in need especially for an elevated railway station to block vibration of a train and secondary noise effectively. Even though a vertical vibration isolation device is able to be applied effectively to railway facilities such as elevated railway stations which transfer vibration directly from a train to a structure, the development of the vertical device is much slower than a horizontal vibration isolation device. In this paper, a vibration isolation device using wedge type friction material which is currently developing to reduce train-induced vibration effectively is introduced and test results for verification of dynamic performance is also presented. The vibration test on a concrete structure equipped with the developed vibration isolation device is conducted through which the isolation performance and dynamic properties are verified and needs for improving the performance of the device is identified.

KEYWORDS

vibration isolator
frictional wedge
vibration
dynamic stiffness
damping ratio

도심지에 건설되는 철도역사, 선로구조물 등 철도시설물의 경우 소음 및 진동 저감 설계의 중요성이 더욱 커지고 있다. 특히 선하역사는 구조물 위에 선로가 놓이게 되므로 철도 진동과 이로 인한 2차 소음을 효과적으로 차단할 수 있는 진동 제어 대책이 더욱 필요한 상황이다. 수직형 방진장치는 열차 운행으로 인한 진동이 직접적으로 전달되는 선하역사 등 철도시설물의 진동 저감에 효과적으로 적용될 수 있으나, 수평형 장치에 비하여 개발이 미진한 상황이다. 이 논문에서는 열차에 의한 진동을 효과적으로 저감하기 위해 개발 중인 마찰썰기형 방진장치를 소개하고, 동적성능 검증을 위한 시험 결과를 제시하였다. 개발된 방진장치의 성능 검증을 위하여 시제품을 적용한 콘크리트구조물에 대한 강제 가진시험을 수행하였으며, 시험결과를 통해 방진장치의 방진성능 및 동특성을 검증하고 방진장치 개선사항을 검토하였다.

방진장치
마찰썰기
진동
동적 강성
감쇠비

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-31-478-3175. Fax. 82-70-8282-9946.
Email. ysji@enrtech.co.kr

1 Tel. 82-31-478-3185. Email. cylee@enrtech.co.kr

ARTICLE HISTORY

Received Feb. 11, 2015
Revised Mar. 06, 2015
Accepted Mar. 19, 2015

1. 서론

최근 들어 열차의 쾌적성에 대한 사회적 요구가 커지면서 열차 소음 진동에 대한 법적 규제가 점차 엄격해지고 있으며, 이에 따라 열차에 의한 소음과 진동을 줄이기 위한 연구가 꾸준히 계속되고 있다. 이 가운데 플로팅 슬래브케도는 하부에 스프링상수가 낮은 방진재를 배치하여 열차의 진동을 효과적으로 감소할 수 있도록 구성된 일종의 질량-스프링 시스템(mass-spring system)으로, 가장 효과적으로 열차에 의한 진동을 저감할 수 있는 대책으로 주목 받고 있다(Jang et al., 2014).

특히 도심에 건설되는 철도 역사나 교량 등의 철도구조물은 열차의 진동이 직접 구조물로 전달되어 증폭될 수 있으며, 최근 철도의 입체화로 건설이 증가하고 있는 선하역사의 경우 구조물 위에 선로가 놓이게 되므로 철도 진동과 이로 인한 2차 소음을 효과적으로 차단할 수 있는 고도의 진동 제어 대책이 더욱 필요한 상황이다(Jang et al., 2010; Kim et al., 2008b).

열차의 운행으로 인해 발생하는 진동에 대한 대책은 발생원, 전달경로, 응답원에서 각각 수립이 가능하지만, 응답원으로 갈수록 저감대책 적용 범위가 커지며 효율도 떨어지는 경향을 가지므로, 가장 효과적인 저감 방법은 진동원과 구조물 사이에 에너지 소산능력을 가진 진동격리장치(vibration isolator)를 설치하는 것이다(Park et al., 2011). 대표적인 진동격리장치로는 교량, 건물 등에 적용되는 면진받침이 있다(Lee et al., 2006). 그러나 이러한 방진받침은 대부분 지진 등 수평방향의 대규모 진동에 대한 구조적 안전성을 위한 수평방향의 진동 제어용이므로, 역사구조물이 선로 직하에 위치한 선하역사와 같은 구조물에서 열차에 의한 진동을 효과적으로 저감하기 위해서는 수직방향 진동의 전달을 효과적으로 차단할 수 있는 장치의 적용이 필요하다. 철도시설에서 열차 운행에 따른 소음 진동에 가장 효율적인 저감 기술은 플로팅 케도공법으로서 국내·외 다수의 사례를 통해 검증된바 있다(Kim et al., 2008a).

최근 선하역사 진동저감을 위해 수행된 국토교통부 연구개발과제인 ‘저진동 케도(슬래브케도) 개발’을 통해 국내 기술 자립화 기반을 마련하였으나 아직 사업화까지는 이르지 못한 실정이며, 천안아산역, 광명역 등 최근 건설된 역사에 적용된 진동제어시스템도 대부분 고가의 외국제품으로 고속화/중량화되는 철도 산업의 전망을 감안할 때 관련 기술의 국산화를 통한 진동제어설계의 경제성 확보가 시급한 상황이다(Jang et al., 2010). 특히 플로팅케도에 적용되는 진동저감장치 또는 방진받침은 보다 효율적이고 안정적인 제품 개발을 위한 연구가 지속적으로 필요한 상황이다.

이 논문에서는 진동제어가 용이하고 경제적이며 플로팅 케도슬래브에 적용 가능한 진동저감장치를 개발하고, 이에 대한 거동시험을 통해 방진 성능을 검증한 결과를 제시하였다. 이를 위해 코일스프링(Coil Spring) 시스템에 썰기형 블록의 마찰을 이용한 진동저감장치 원리를 제시하고 시험품 제작 및 거동시험을 통해 개발된 장치의 동적특성 및 감쇠성능을 확인하였다. 방진장치는 경사면에 적용된 엔지니어링 플라스틱(Engineering Plastic) 재질 썰기형 블록의 마찰저항을 이용하여 연직 진동을 감쇠시키고, 수평 및 수직으로 배치된 코일스프링을 통하여 복원력을 제공하는 구조이다. 거동시험은 콘크리트 블록에 방진장치 시험체를 연결하여 일체화된 방진시스템을 구성하고, 콘크리트 블록상단에 하중을 재하하는 방식으로 진행하였으며, 가력 진동의 진동수별, 강제변위량별 방진장치의 성능 변화 추이 분석을 통해 마찰썰기형 방진장치 원리의 타당성을 검증하였다.

2. 마찰썰기형 연직방진장치 개발

2.1 방진장치 구조

본 연구에 적용된 마찰썰기형 방진장치의 구조는 아래 Fig. 1과 같으며, 다음의 다섯 부분으로 구성된다: 연직 하중에 대하여 수직 및 수평방향으로 저항하는 중앙 스프링과 수평 스프링; 상부하중을 직접 지지하고 하부로 전달하는 상·하부 플레이트 와 경사면; 수평 스프링으로 지지되고 마찰 저항을 일으키는 썰기블록.



Fig. 1. Friction wedge type vibration isolator

2.2 방진장치 거동방정식

마찰썰기형 방진장치의 거동을 수식화하기 위한 과정은 다음과 같다. 장치의 상면에 연직으로 하중 P 가 재하될 때 방진장치는 중앙 스프링과 양측 경사면에 의한 임의의 분력 P' 으로 지지하게 된다. 경사면에 작용하는 하중 P' 는 경사면과 썰기블록 간의 마찰력과 측면 스프링에 의한 복원력의 힘의 평형 조건으로부터 수식을 유도하였다. 방진장치 거동방정식을 이루는 주요 인자는 중앙 스프링(k_c), 수평 스프링(k_h), 마찰면의 경사(S)와 마찰 계수(μ , Friction Coefficient)가 있다.

Fig. 2는 마찰면에서의 하중평형 조건(Equilibrium of Force)에 따른 썰기블록 마찰면에 대한 자유물체도이다. Eq. 1은 상부 플레이트로 전달되는 하중 P 과 방진장치 내부 분력 간의 힘의 평형방정식이며, 중앙 스프링의 강성 k_c 와 방진장치 연직 변위 z , 양측 경사면에 작용하는 분력 P' 으로 구성되어 있다. 마찰면에 작용하는 힘의 평형을 근거로 장치의 연직 변위에 대한 강성의 조합을 수식으로 유도할 수 있으며, 결과는 아래 Eqs. 2와 3과 같다.

$$P = k_c z + 2 P' \tag{1}$$

$$\text{Downward} - P = \left[k_c + \frac{k_h (1 + \mu S)}{S(S - \mu)} \right] z \tag{2}$$

$$\text{Upward} - P = \left[k_c + \frac{k_h (1 - \mu S)}{S(S + \mu)} \right] z \tag{3}$$

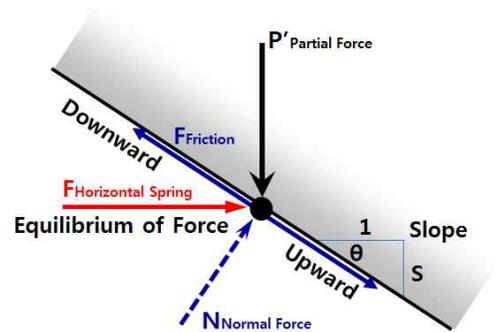
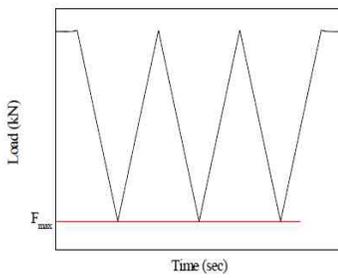


Fig. 2. Free body diagram of friction surface

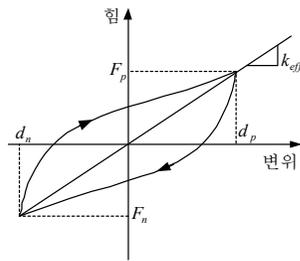
2.3 실내시험을 통한 이론검증

열차에 의한 진동저감을 목적으로 개발된 마찰썰기형 방진장치에 대한 이론 및 거동방정식의 적정성을 검증하고자 실내시험을 수행하였다. 시험방법은 방진장치 성능시험방법 DIN 45673-1 "9. 레일 지지부 및 궤도 하부를 위한 탄성요소(Mass-Spring-System)"을 참조하였다.

입력하중은 Fig. 3(a)와 같은 파형으로 작용시켰으며, 방진장치의 하중-변위이력곡선은 Fig. 3(b)와 같다. 방진장치의 유효강성(k_{eff}) 및 감쇠비(β_i)는 Eqs. (4), (5)를 이용하여 산정할 수 있다. Fig. 4와 Table 1은 시험에 적용한 방진장치 및 이에 대한 제원이다. 입력하중 속도는 50mm/sec를 적용하였으며, 시험은 선재하 하중(pre-loading)이 없는 경우와 궤도설치조건을 고려한 선재하중 20kN을 적용한 경우에 대하여 수행하였다.



(a) Test excitation load



(b) Load-displacement loop

$$k_{eff} = \frac{F_p - F_n}{d_p - d_n} \quad (4)$$

$$\beta_i = \frac{1}{2\pi} \frac{Area\ of\ EDC}{\sum (k_{eff} d_i^2)} \times 100(\%) \quad (5)$$

Fig. 3. Test load and load-displacement relationship

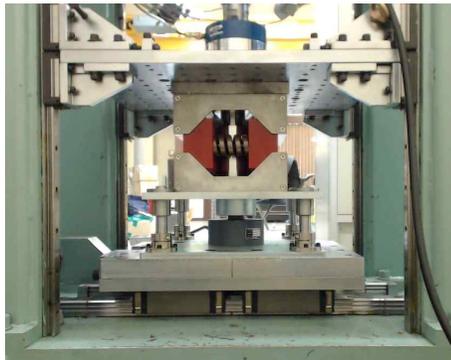
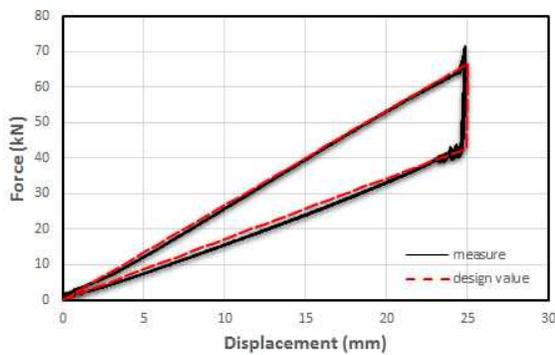


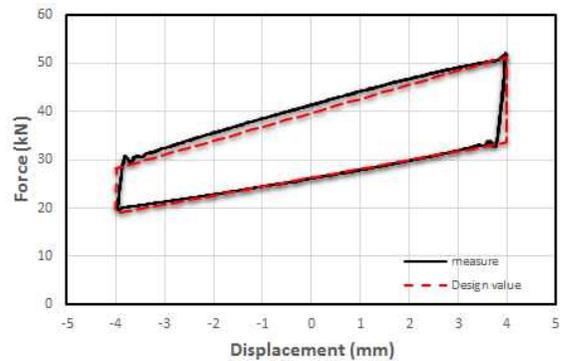
Fig. 4. Test set-up

Table 1. Isolation device specifications

Items	Value
Size(mm)	250(B) × 250(L) × 215(H)
Friction coefficient	0.15
Spring stiffness	564kN/m(center), 1,725(horizontal)
Slope (S)	1.0
Capacity (ton)	8.5
Max. Disp. (mm)	27 mm
Materials	Steel, Coil spring, Engineering plastic



(a) without pre-loading



(b) with pre-loading 20kN

Fig. 5. Load-displacement relationship of test result

Table 2. Properties of device used in the analysis

Classification	Displacement (mm)		Force (kN)		k_{eff} (kN/mm)	EDC	β_i
	d_p	d_n	F_p	F_n			
Test measure	3.968	-3.957	51.572	19.786	4.011	114.703	29.0%
Design value	4.0	-4.0	51.342	18.905	4.055	107.830	26.5%
Error rates					1	6	3

실험은 선재하 하중이 없는 조건에서 변위 25mm 가진 시험 Case와 선하중 20kN 조건에서 8mm 변위 가진시험 Case에 대해 수행하였다. Fig. 5는 진동하중을 이용한 시험결과와 이론식을 적용한 해석결과를 비교한 것이다. 그림에서 이론적 거동방정식을 적용한 해석결과는 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 결과로부터 산정한 동적 스프링 계수와 감쇠비는 Table 2에 제시하였으며, 실험과 이론값과의 오차가 3%이하로 매우 작은 것을 확인하였다. 이 결과로부터 쇄기형 마찰블록을 이용한 방진장치에 대한 이론적 접근이 타당함을 확인할 수 있으며, 거동방정식을 이용한 방진장치의 거동특성 및 성능에 대한 명확한 설계가 가능함을 알 수 있다.

3. 마찰쇄기형 연직방진장치 거동시험

3.1 시험 개요

실내 시험을 통하여 기본적인 성능이 검증된 마찰쇄기형 방진장치를 콘크리트 블록 하부에 배치하여 모의 방진시스템을 구성하고, 가진시험을 수행하였다. 모의 방진시스템에는 높이비가 높은 콘크리트 블록을 사용하여 슬래브의 휨 거동은 배제하고 강체 거동을 유지할 수 있도록 하였고, 방진장치의 동적 강성 및 동적 감쇠비를 도출하였다.



(a) Test set-up



(b) Isolator and test zig



(c) Reaction block and Isolation system

Fig. 6. Isolation system test set-up

시험은 동적 유압가력기를 이용한 조화하중을 콘크리트 블록 상면 중앙에 가진하는 방법으로 진행하였으며, 재하 하중, 연직 변위 및 방진장치 하부의 응답반력을 측정하고 이를 분석하였다. 또한 방진장치의 거동방정식을 이루는 주요 인자 중 중앙 스프링(k_c) 및 수평 스프링(k_h)의 강성을 변경하여 1차, 2차 시험을 진행하였으며, 이를 통해 방진장치의 동적강성 및 감쇠에 대한 영향을 확인하였다. 시험에 적용된 방진장치의 제원은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Device specifications used in the test

Classification	Friction coefficient μ	Slope (S)	k_c (kN/m) (Center spring)	k_h (kN/m) (Horizontal spring)	Device static stiffness (kN/m)
1st Test set	0.15	1.0	564	1,725	2,289
2nd Test set	0.15	1.0	1,136	1,131	2,267

3.2 시험방법 및 조건

시험을 위해 구성된 모의 방진시스템에 대한 거동시험을 위해 Fig. 6과 같이 견고한 반력대 위에 마찰쇄기형 방진장치 4개를 포함한 모의 방진시스템을 설치하고, 콘크리트 블록 상단 중앙에 가진이 가능하도록 유압 가력기(정·동적 250kN)를 위치시켰다. 모의방진시스템의 상하진동시 가력기에 의한 강제 끌어올림이 발생하지 않도록 유압 가력기와 콘크리트 블록사이에서 별도의 고정을 주지 않았으며, 하중재하시 가력 위치변동이 발생하지 않도록 가이드를 설치하였다. 12.5ton 중량의 콘크리트 블록과 방진장치, 반력을 계측하기 위한 시험용 지그는 볼트로 체결하여 이를 반력대에 고정하였다. 시험용 지그에는 각각의 방진장치 하면에서 발생하는 반력 측정을 위해 동적 Load Cell을 설치하였고, 콘크리트 블록 좌우 측면에 모의방진시스템의 상하변위를 계측하기 위해 LVDT를 설치하였다.

시험에 적용된 진동하중의 파형은 변위에 대한 정현파를 적용하였고, 주파수와 진폭을 조절하여 각 시험 case를 구성하였다. 콘크리트 블록의 자중으로 인한 초기처짐은 13mm 이었으며, 방진장치의 변위한계를 고려하여 대변위(10mm), 중간변위(6mm), 작은 변위(2mm)로 추가적인 가진폭을 정하고, 유압가력기의 성능을 고려하여 가진 진동수를 조절하였다. 유압 가력기와 콘크리트 블록의 상하방향 고정체결 미적용에 따라 진동 재하 시 가력기 선단과 콘크리트 블록 간의 이격으로 인한 충격이 발생하지 않도록 초기 변위를 적용하였으며, 이러한 조건을 고려한 시험 Case는 Table 4와 같다.

Table 4. Test Case

Classification	Excitation conditions			Remark
	Frequency (Hz)	Excitation stroke(mm)	Initial displacement (mm)	
Case-01	2.0	10 mm	1 mm	Displacement caused by the weight of concrete blocks is 13mm.
Case-02	3.0			
Case-03	4.0			
Case-04	2.0	6 mm	3mm	
Case-05	4.0			
Case-06	6.0			
Case-07	2.0	2 mm	5mm	
Case-08	4.0			
Case-09	6.0			
Case-10	8.0			
Case-11	10.0			
Case-12	12.0			

3.3 시험결과 및 분석

Fig. 7은 가진시험 결과로 도출한 하중-변위이력곡선이다. Eqs. 2, 3의 거동방정식에서 마찰계수를 상수로 가정할 때 마찰쇄기형 방진장치는 선형이력거동 한다. 그러나 일반적으로 마찰재의 마찰계수는 접촉압력 및 마찰속도에 따라 변하게 되어 시험결과와 같이 비선형성을 가지게 된다. 1차, 2차 시험 간의 거동 차이도 동일한 원인으로 기인한 것으로 판단된다. 10mm , 6mm Stroke의 시험 결과를 살펴보면, 2차 시험 결과의 등가감쇠비가 적게 나타났으며, 저속 가진시 좀 더 두드러진 경향을 보이고 있다. 마찰접촉면의 압력이 높은 1차 시험 결과에서는 비선형적 거동으로 인해 이력곡선에 파상형상의 구간이 보여지고 있으며, 상대적으로 마찰면 압력이 낮은 2차 시험 결과는 보다 선형적 거동을 보여 주고 있다.

10mm, 6mm 가진 시험 이력곡선의 하중감소구간의 특정 범위에서 하중이 순간 증가되는 구간이 확인되는데 모의 방진시스템의 상향 관성력으로 인한 일시적 쳐올림 현상으로 추정되나 정확한 원인은 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

작은 변위(2mm) 가진시험의 경우 저진동 가진 Case에서 감쇠항의 강성의 차에 따른 방진장치 거동의 차이가 극명하게 확인된다. 이는 작은 변위를 유발한 가진력에 비해 마찰에 의한 저항력이 커 정적마찰(Static Friction)과 동적마찰이(Kinetic Friction)이 번갈아 일어나는 스틱슬립(Stick Slip)형태의 거동으로 판단되며, 마찰감쇠 강성을 줄인 2차 시험에서는 1차 시험보다 명확한 이력거동을 보였다. 특히 1차 시험 12Hz의 시험 Case에서는 마찰 저항력이 상대적으로 커서 이력거동이 일어나지 않아 계측이 불가하였다. 마찰을 이용한 감쇠기구를 적용하고자 할 때 반드시 고려되어야 할 부분으로 주로 저속에서 발생하는 이러한 현상은 마찰형 방진장치의 거동을 부드럽지 못한 거동을 초래하게 되어 오히려 진동을 유발시키게 되므로 반드시 해결해야 할 문제이다.

2mm 가진시험에서 1차 시험에서는 2~6Hz까지 가력하중에 대해 방진장치의 연직변위가 점차 증가하다가 8Hz 이후 다시 응답변위가 줄어들었으며, 2차 시험에서는 8Hz에서 진동응답이 증폭된 것으로 확인된다. 이는 방진시스템의 공진 주파수와 연관이 있는 것으로 추정된다. Table 5는 시험결과를 토대로 계산한 각 거동영역에서의 방진장치의 성능이다.

Fig.8은 시험결과로부터 얻은 가진 환경별 방진장치의 등가강성과 등가감쇠비에 대한 도표이다. 분석 결과로부터 가진 폭이 큰 저주파의 진동환경에서 거의 일정한 동적 강성 및 감쇠성능을 유지하며, 진동폭이 작아질수록 동적 등가강성과 감쇠가 점점 크게 발전되는 특징을 보이고 있다. 또한 진동폭이 작아질수록 진동의 환경에 대한 민감도가 증가되며, 시스템 고유진동영역에서 강성과 감쇠비가 줄어드는 특성을 확인하였다. 또한 수평 스프링의 강성에 따라 마찰면에 작용하는 면압에 따른 민감도는 크지 않은 것으로 판단된다. 다만 저속에서 발생한 스틱슬립을 방지하기 위해서는 작은 수평 강성이 유지되어야 할 것으로 판단된다. 수평 스프링의 강성에 따라 방진장치의 동적강성이 좌우되며 정적강성의 약 2배에서 8배 증대되었다. 또한 진폭이 커질수록 강성증가율이 커지는 경향을 보였다. 그러나 등가감쇠비는 강성에 비해 진동환경에 대한 영향이 적은 것으로 나타났다. 진동환경에 따른 방진장치의 거동 특성은 1차, 2차 시험에 동일한 경향을 보이며, 마찰제거형 방진장치의 고유 특성임을 알 수 있다.

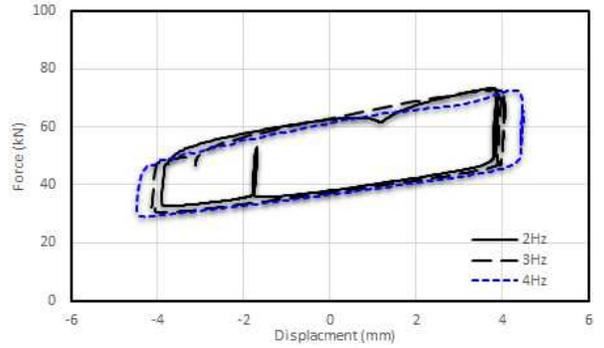
Fig. 9는 시험결과로부터 가진 변위 및 가진 진동수로부터 가진 속도를 계산하였고, 이를 이용하여 방진장치에서 발현된 등가강성 및 감쇠비와 가진 속도와의 상관관계를 유추하여 작성한 도표이다. 분석결과 가진 속도가 저속에서 고속으로 증가 될수록 등가강성이 일정한 값으로 안정화되는 경향을 보이며, 감쇠비는 점차 감소되는 경향을 보였다. 그러나 본 시험의 결과만으로는 속도증가에 따라 일정한 임계치에 안정화되는지, 혹은 비감쇠 거동으로 변화되는지는 유추하기 어려운 측면이 있다. 다만 1차 2차 시험 결과를 통해 마찰면에 작용하는 면압의 영향을 가늠해 볼 수 있다.

Table 5. Analysis of test results and specifications

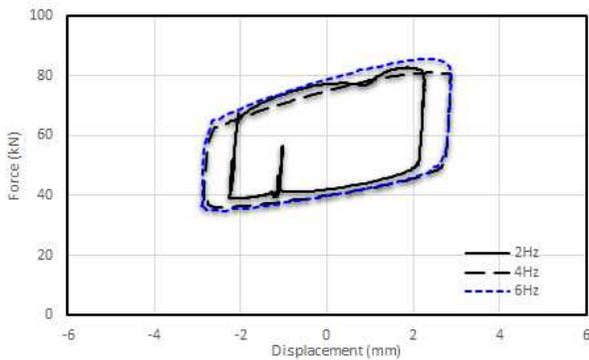
Classification		Case -01	Case -02	Case -03	Case -04	Case -05	Case -06	Case -07	Case -08	Case -09	Case -10	Case -11	Case -12
Excitation	Stroke	10mm			6mm			2mm					
	Hz	2	3	4	2	4	6	2	4	6	8	10	12
	V(mm/s)	40	60	80	24	48	72	8	16	24	32	40	48
1st Test	Keff	6.11	5.44	5.74	8.86	7.50	7.90	15.85	11.80	9.00	9.88	14.42	-
	Damping ratio	0.44	0.52	0.44	0.55	0.51	0.52	0.62	0.62	0.70	0.66	0.68	-
	Surface pressure	2.30	2.25	2.40	2.02	2.02	2.02	1.91	1.86	1.92	1.88	1.86	-
2nd Test	Keff	4.76	4.54	3.71	5.38	5.51	5.59	12.69	8.91	7.52	5.71	7.30	14.28
	Damping ratio	0.40	0.43	0.45	0.50	0.43	0.37	0.60	0.58	0.66	0.55	0.68	0.70
	Surface pressure	1.25	1.19	1.13	1.21	1.24	1.35	1.15	1.16	1.19	1.20	1.23	1.17



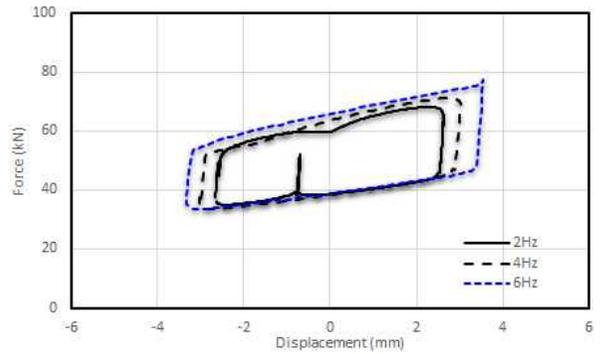
(a) 10mm excitation (1st test)



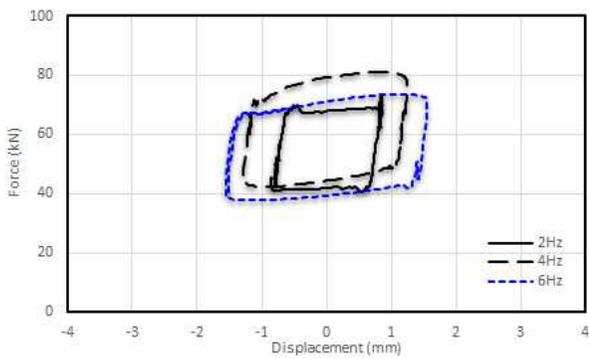
(b) 10mm excitation (2nd test)



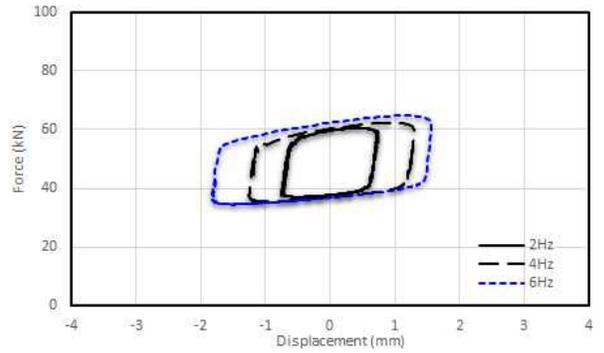
(c) 6mm excitation (1st test)



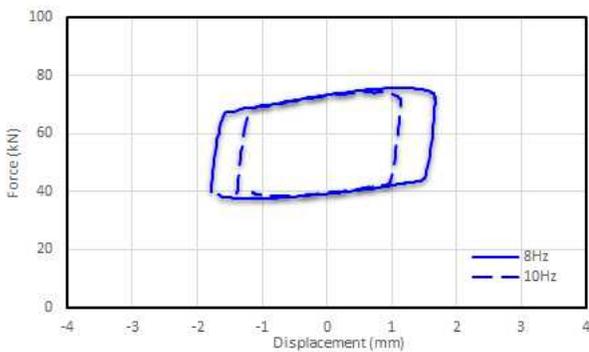
(d) 6mm excitation (2nd test)



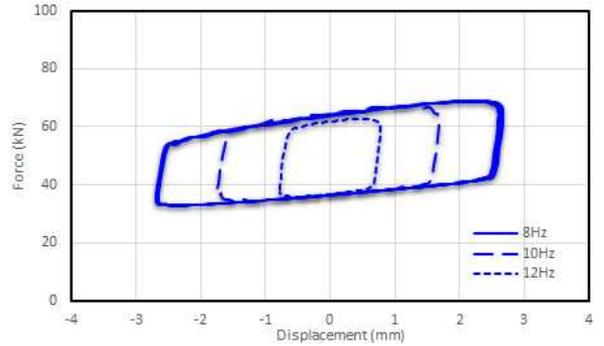
(e) 2mm excitation (1st test)



(f) 2mm excitation (2nd test)

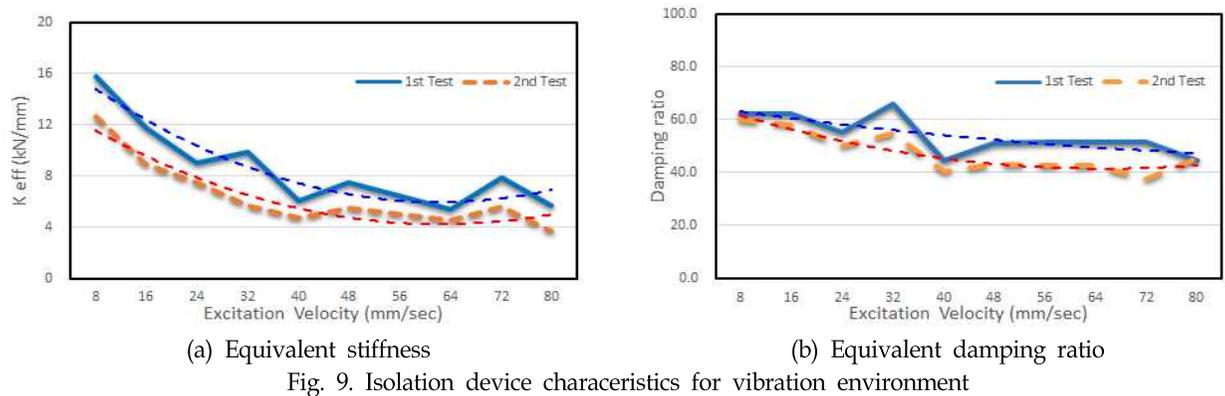
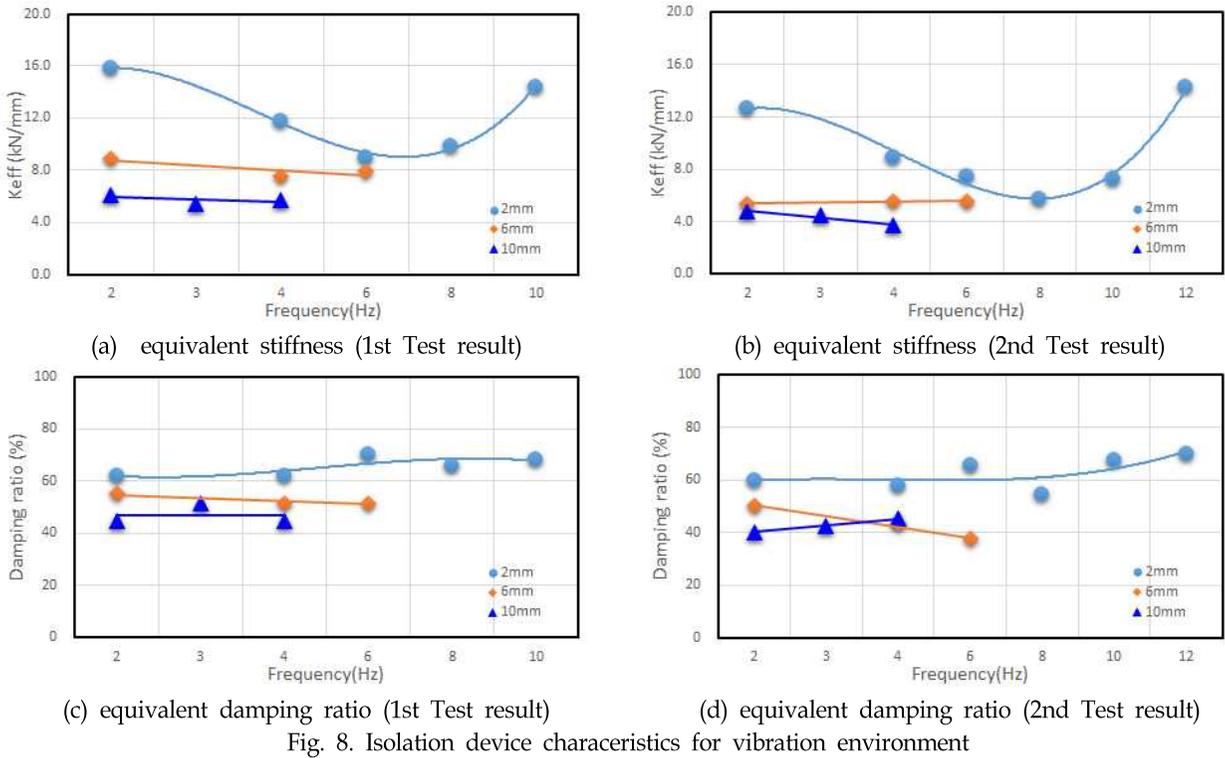


(g) 2mm excitation (1st test)



(h) 2mm excitation (2nd test)

Fig. 7. Load-displacement relationship of Test result



4. 결론

이 연구에서는 썰기형태의 마찰블록을 이용한 철도궤도용 방진장치의 거동이론을 수립하고, 시험을 통하여 장치의 특성을 분석하였다. 시험 결과에 대한 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 썰기형 마찰 블록을 이용한 연직방진장치 개발을 위해 이에 대한 거동방정식을 수립하였다. 방진장치 시험품을 제작하고 실내시험을 수행한 결과, 이론에 따른 이력거동과 일치하는 결과를 보였으므로, 마찰썰기형 방진장치에 대한 이론적 모델이 타당하다고 판단된다.
- (2) 시험을 통해 썰기형 마찰블록을 이용한 방진장치는 수평 스프링 강성이 클수록 감쇠비가 증가하고, 저속의 가진환경에서 스틱슬립(Stick Slip)이 발생되며, 수평 스프링 강성을 줄였을 때 저속에서도 이력거동이 원활해지는 특징을 확인하였

다. 스틱슬립(Stick Slip)은 오히려 진동을 가중시킬 우려가 있으므로 방진장치 설계시 이에 대한 고려가 반드시 필요하다.

(3) 개발된 방진장치의 주요 설계인자 중 연직방향 복원력을 제공하는 중앙 스프링의 강성과 췌기블록의 마찰거동을 유도하는 수평스프링의 강성비에 따라 마찰면에 작용하는 면압이 달라지며, 이에 따라 방진장치의 등가강성 및 감쇠의 변화 특성을 파악하였다. 방진장치의 이러한 특성을 이용하면 방진장치의 명확한 성능 설계가 가능할 것으로 판단된다.

(4) 마찰형 연직 방진장치는 진폭이 큰 진동환경에서 일정한 등가강성 및 감쇠비를 유지하고, 진폭이 작은 진동환경에서는 시스템의 동특성(고유진동수)에 영향을 받아 가진 진동수에 따라 강성 및 감쇠비가 줄어드는 특징을 갖는 것을 확인하였다.

(5) 방진장치는 가진되는 진동의 진폭이 작아질수록 동적 강성과 감쇠비가 증가되는 경향을 보이며, 가진 속도가 증가될수록 장치의 특성값이 일정 값으로 안정화되는 특징을 갖는 것을 확인하였다.

(6) 방진장치의 명확한 거동 및 방진성능 설계를 위해서는 적정 마찰재 선정이 필요하며, 마찰재의 물리적 특성 파악이 중요하다. 가진 속도 및 접촉압력에 따른 마찰계수의 변화에 대한 수식화는 향후 추가적인 연구를 통하여 수행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업 “역사 구조물 소음/진동 저감기술 개발”의 연구비 지원(과제번호 : 14RTRP-B068875-02)에 의하여 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

- Baek, J.H., Lee, Y.I., Lee, J.T. (2011). "Seismic isolation design for nuclear power station." Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, No. 2, pp.50-59.
- Biswas, S.K., Vijayan, K. (1992). "Friction and wear of PTFE - a review." Wear, Vol. 158, pp.193-211.
- Choi, S., Baek, J.-H., Lee, Y.I. (2012). "Vertical vibration isolator for reducing structural vibration." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 8, No. 2, pp.198-204.
- Hwang, J. (2004). " Vibration control system for serviceability enhancement of a structure." Review of Architecture and Building Science, Vol.48, No.7, pp.56-61.
- Jang, S.Y., Cho, H.-H., Yang, S.C. (2010). "Vibration analysis of station under railway lines with floating slab track." Proceedings of 2010 Spring Conference, Korean Society for Railway, pp.1719-1724.
- Jeon, G.-S., Hong, C.-S. (2010). "Development of supersize rubber using castable urethane elastomer." Proceedings of Annual Spring Conference, Earthquake Engineering Society of Korea, pp.249-252.
- Kim, J.H., Han, S.Y. (2008a). "The review of floating slab tracks for vibration reduction of railway station." Korean Journal of Environmental Engineers, Vol. 30, No. 6, pp.581-586.
- Kim, J.H., Youn, S.H. (2008b). "The review of floating slab tracks for vibration reduction of railway station." Korean Journal of Environmental Engineers, Vol. 30, No. 6, pp.581-586.
- Park, H.G., Lee, Y.I., Jung, D.Y. (2011). "Experimental and analytical study of the dynamic behavior of a polyurethane spring restoring disk bearing." Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 15, No. 2, pp.61-69.
- Tecklenburg, M. (2003). "Vibration control in tramway and L.R.T. systems." International Conference on Contemporary Tram and L.R.T. Systems, Greece.
- Yu, S.M., Jung, D.Y. (2011). "Development of the vertical isolation device." Proceedings of Annual Spring Conference, Earthquake Engineering Society of Korea, pp.221-224.
- Jang, S.Y., Yang, S.C. (2014). "Assessment of train running safety, ride comfort and track serviceability at transition between floating slab track and conventional concrete track" Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 1, pp.48-61.