



전달행렬법을 이용한 레버형 반공진 진동 절연기 특성 연구

Study on Performances of the Lever Type Anti-resonance Vibration Isolator Using Transfer Matrix Method

윤종환* · 이형일†
Jong-Hwan Yun* and Hyeongill Lee†

(Received July 16, 2018 ; Revised August 21, 2018 ; Accepted August 21, 2018)

Key Words : Transfer Matrix(전달행렬), Lever Mechanism(레버 메커니즘), Anti-resonance(반공진), Vibration Isolator(진동절연기), Accelerance(가속도 주파수 응답 함수), Dynamic Characteristics(동특성)

ABSTRACT

Transfer matrix for the lever type dynamic anti-resonance vibration isolator (L-DAVI) is defined by the vector type four pole parameter method. Defined matrix is applied to a 2-DOF vibratory system with an L-DAVI to obtain the transfer matrix for the total system. The accuracy of the transfer matrix for the L-DAVI is validated by comparing system accelerance from transfer matrix method (TMM) with that from conventional method. Accelerance for a 4-DOF target system simulating a real mechanical system is calculated using TMM. Finally the optimal configuration and location of the L-DAVI(s) to improve system accelerance are investigated using the transfer matrix for the L-DAVI in the first step. The effects of L-DAVI are studied by comparing response characteristics of the modified system with that of original system along with the advantages of TMM over the conventional method.

1. 서 론

시스템 내의 각 요소 사이에서 진동 전달을 저감하는 것은 기계공학의 전통적인 문제점의 하나이며 이러한 목적을 달성하기 위한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 또한 그 결과로 여러 장치들과 방법들이 소개되었으며 다양한 공학 분야에 적용되고 있다⁽¹⁻⁵⁾. 그러한 방법 중의 하나가 시스템 내에 반공진 특성을 도입하여 진동 전달을 저감하는 반공진 진동 절연기(dynamic anti-resonance vibration isolator: DAVI)이다^(3,4). 이 방법의 하나의 형태가 레버를 이용하여 절연기 내의 관성을 연성시킴으로써 반공진 현상을

도입시키는 레버형 반공진 진동 절연기이며 이 시스템에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다⁽³⁻⁶⁾. Flannelly는 하나 이상의 레버와 스프링, 감쇠기를 조합한 다양한 형태의 레버-감쇠 절연기(lever-damper isolator: LDI)를 제안하였다⁽³⁾. 또한, Yilmaz와 Kikuchi는 반공진 진동 절연기의 운동 방정식을 유도하고 이를 이용하여 스프링 강성, 레버비 및 질량비가 절연기의 성능에 미치는 영향을 분석하였다⁽⁴⁾. Li와 Gohnert는 두 개의 레버, 스프링 및 감쇠기로 이루어진 레버-감쇠 절연기를 소개하였다⁽⁵⁾. 마지막으로 Yun 등은 레버형 반공진 진동 절연기의 설계 변수들에 대한 매개변수 연구를 통하여 절연기의 구성이 성능에 미치는 영향을 분석하였다⁽⁶⁾.

† Corresponding Author; Member, School of Automotive Engineering, Kyung-pook National University
E-mail: hilee@knu.ac.kr

* Member, Department of Automobile, Yeosu Institute of Technology

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

많은 경우에 있어 여러 개의 하위 시스템으로 구성되어 있는 대형 시스템의 동적인 특성은 하위 시스템들의 특성을 이용하여 나타낼 수 있으며, 이러한 접근 방법의 하나가 입력단과 출력단 사이의 관계를 나타내는 네 개의 주파수 함수를 이용하여 시스템의 특성을 정의하는 기계적 4단 정수법이다⁽⁷⁾. 이러한 접근 방법의 장점은 전체 시스템의 전달함수를 시스템을 구성하고 있는 하위 시스템의 전달함수를 단순히 곱하여 구할 수 있다는 점이다⁽⁸⁾. 또한 단수입력-단수출력(single-input/single-output: SISO) 시스템의 경우 앞에서 설명된 기계적 4단 정수가 해당 시스템의 전달행렬과 동일하다⁽⁹⁾. 마지막으로 복잡한 기계공학 시스템의 전달행렬은 시스템을 구성하고 있는 요소들의 전달행렬을 이용하여 정의될 수 있다^(10,11).

이 연구에서는 레버형 반공진 진동 절연 시스템에 대한 4단 정수를 유도한다. 또한 레버형 반공진 진동 절연 시스템이 SISO 시스템임을 고려하여 유도된 4단 정수를 시스템의 전달행렬로 정의한다. 이렇게 정의된 L-DAVI 시스템의 전달행렬을 이용하여 이 시스템이 포함된 간단한 시스템의 응답특성을 계산한다. 다음 그 결과를 미분방정식과 행렬을 이용한 전통적인 방법으로 얻어진 결과와 비교하여 해당 전달행렬의 정확도를 검증한다. 마지막으로 L-DAVI 시스템을 적용하여 4자유도 진동 시스템의 응답특성을 개선하는 방법을 검토한다. 특정한 주파수 영역의 응답특성을 개선하기 위한 L-DAVI 시스템(들)의 최적 구성과 위치를 검토하고 검토된 L-DAVI 시스템을 적용했을 때 나타나는 응답특성 개선 효과를 이 연구에서 제시된 접근 방법을 이용하여 검토한다.

2. 전달행렬법 (Transfer Matrix Method: TMM)

선형 특성을 가진 복잡한 시스템을 각각의 기계적인 특성을 가진 여러 개의 하위 시스템으로 분리한다. 다음 이들을 이용하여 원래 시스템의 특성을 정의하는 방법이 전달행렬법이다^(10,11). 이 연구에서는 기계적인 4단 정수를 바탕으로 입, 출력단의 속도와 작용력 벡터로 이루어진 상태벡터를 기준으로 하위 시스템의 전달행렬들을 정의하였다. 전달행렬은 이 상태벡터를 입력단에서 출력단으로 전달하며 전체 시스템

의 특성은 각 하위 시스템의 전달행렬을 조합하여 구할 수 있다.

2.1 TMM의 개요

SISO 시스템의 전달행렬의 개념은 기계적인 4단 정수를 이용하여 식 (1)과 같은 행렬방정식으로 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$\begin{Bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{V}_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{F}_2 \\ \bar{V}_2 \end{Bmatrix} = G_{12} \begin{Bmatrix} \bar{F}_2 \\ \bar{V}_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

이 식에서 G_{12} 는 주어진 시스템의 입력단과 출력단 사이의 전달행렬이며 $\{\bar{F}_1, \bar{V}_1\}^T$ 과 $\{\bar{F}_2, \bar{V}_2\}^T$ 는 각각 양단의 작용력 및 속도 벡터이다⁽⁷⁾.

$$\alpha_{11} = \left. \frac{\bar{F}_1}{\bar{F}_2} \right|_{\bar{V}_2=0}, \quad \alpha_{12} = \left. \frac{\bar{F}_1}{\bar{V}_2} \right|_{\bar{F}_2=0}$$

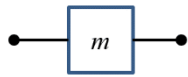
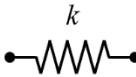
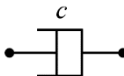
$$\alpha_{21} = \left. \frac{\bar{V}_1}{\bar{F}_2} \right|_{\bar{V}_2=0}, \quad \alpha_{22} = \left. \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} \right|_{\bar{F}_2=0} \quad (2)$$

위 식에서 $\bar{V}_i=0$ 는 i 단이 고정단이라는 의미이며 $\bar{F}_i=0$ 는 i 단이 자유단이라는 의미이다. 위의 정의에 따라 진동시스템의 기본 요소들에 대한 전달함수를 유도하면 Table 1과 같다⁽⁷⁾.

2.2 연결 시스템의 전달행렬

공학적인 시스템 연결 방법은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 1) 직렬연결 2) 병렬연결로 크게 나누어진다. 직렬연결에서 i 번째 요소의 출력단은 $(i+1)$ 번째 요소의 입력단과 동일하다. 병렬연결의 경우에는 그

Table 1 Transfer matrices for the basic vibration elements

Element	Symbol	Transfer matrix (G)
Mass		$\begin{bmatrix} 1 & i\omega m \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Spring		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ i\omega & 1 \\ k & \end{bmatrix}$
Damper		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ c & \end{bmatrix}$

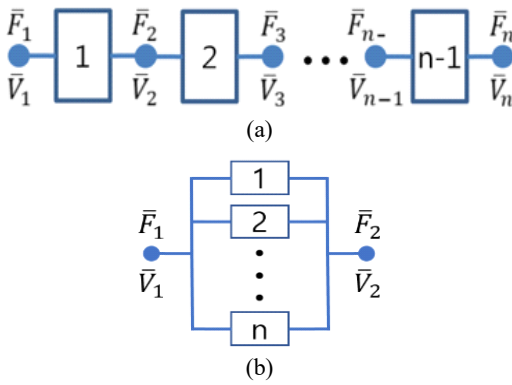


Fig. 1 System with multiple subsystems connected in serial or parallel

림에서 보는 바와 같이 연결된 모든 요소들이 하나의 입력단과 하나의 출력단을 공유하게 된다. 또한 Fig. 1(a)에 주어진 시스템과 같이 $(n-1)$ 개의 요소가 직렬로 연결된 전체 시스템의 전달행렬은 각 하위시스템의 전달행렬을 이용하여 식 (3)과 같이 정의된다⁽⁷⁾. 이 식에서 $\Gamma_{(i)(i+1)}$ 는 i 번째 요소의 전달행렬을 표시한다.

$$\begin{cases} \bar{F}_1 \\ \bar{V}_1 \end{cases} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}_1 \cdots \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}_{n-1} \begin{cases} \bar{F}_n \\ \bar{V}_n \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{F}_1 \\ \bar{V}_1 \end{cases} = \Gamma_{12} \Gamma_{23} \cdots \Gamma_{(n-1)(n)} \begin{cases} \bar{F}_n \\ \bar{V}_n \end{cases}$$

또한 n 개의 하위요소가 병렬로 연결되어 있는 시스템의 전체 전달행렬은 다음의 식 (4)와 같이 구할 수 있다⁽¹¹⁾. 이 식에서 $(\alpha_{nm})_i$ 는 i 번째 요소의 전달행렬을 구성하고 있는 각 요소를 표시한다⁽⁷⁾.

$$\begin{cases} \bar{F}_1 \\ \bar{V}_1 \end{cases} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix} \begin{cases} \bar{F}_2 \\ \bar{V}_2 \end{cases} \quad (4a)$$

$$\beta_{11} = \frac{P}{Q}, \quad \beta_{12} = \frac{PR - Q^2}{Q}, \quad (4b)$$

$$\beta_{21} = \frac{1}{Q}, \quad \beta_{22} = \frac{R}{Q}$$

$$\beta_{11} = \frac{P}{Q}, \quad \beta_{12} = \frac{PR - Q^2}{Q}, \quad (4c)$$

$$\beta_{21} = \frac{1}{Q}, \quad \beta_{22} = \frac{R}{Q}$$

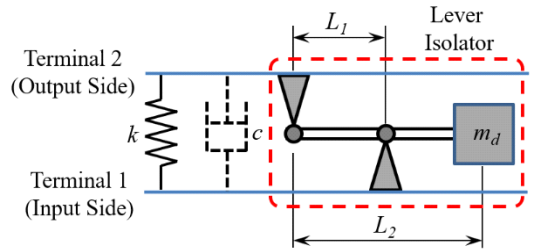


Fig. 2 Mechanical model of the L-DAVI system

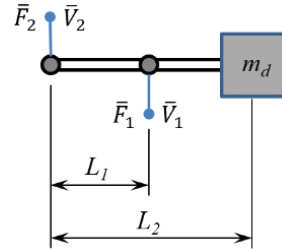


Fig. 3 Mechanical model of the lever isolator

3. L-DAVI에 대한 전달행렬

3.1 L-DAVI에 대한 전달행렬의 유도

L-DAVI 시스템의 개략적인 설명도가 다음 Fig. 2에 주어져 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시스템에는 레버형 절연기가 스프링과 감쇠기와 병렬로 연결되어 있다. 이 연구에서는 시스템 내에서 질량을 형성시키는 레버의 질량과 질량관성모멘트는 무시할 수 있다고 가정하였다.

일반적으로 원래의 L-DAVI 시스템에는 별도의 감쇠기가 포함되어 있지 않으나 이 연구에서는 시스템의 고유한 구조 또는 재료 감쇠를 표현하기 위하여 적절한 크기의 점성감쇠를 추가하였다. 따라서 Fig. 2에 주어진 전체 시스템의 전달행렬(Γ_{DAVI})은 다음 식과 같이 스프링, 감쇠기 및 절연기에 대한 전달행렬을 이용하여 식 (4)와 같이 정의할 수 있다. 스프링과 점성감쇠에 대한 전달행렬은 Table 1에 주어져 있으므로 전체 시스템의 전달행렬(Γ_{DAVI})를 구하기 위해서는 우선 절연기의 전달행렬을 정의하여야 한다. 절연기에 대한 간략도와 입력단과 출력단이 Fig. 3에 설명되어 있다. 2.1절에 설명되어 있는 방법과 식 (2)를 이용하여 절연기에 해당하는 전달행렬(Γ_I)을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\Gamma_L = \begin{bmatrix} (\alpha_{11})_L & (\alpha_{12})_L \\ (\alpha_{21})_L & (\alpha_{22})_L \end{bmatrix} \tag{5a}$$

$$(\alpha_{11})_L = \left. \frac{\bar{F}_1}{\bar{F}_2} \right|_{\bar{V}_2=0} = \frac{r_l}{(r_l - 1)} \tag{5b}$$

$$(\alpha_{12})_L = \left. \frac{\bar{F}_1}{\bar{V}_1} \right|_{\bar{F}_2=0} = 0 \tag{5c}$$

$$(\alpha_{21})_L = \left. \frac{\bar{V}_1}{\bar{F}_2} \right|_{\bar{V}_2=0} = \frac{1}{i\omega m_d r_l (r_l - 1)} \tag{5d}$$

$$(\alpha_{22})_L = \left. \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} \right|_{\bar{V}_2=0} = \frac{(r_l - 1)}{r_l} \tag{5e}$$

이 식에서 $r_l = L_2/L_1$ 은 절연기의 레버비(lever ratio)이며 ω 는 조화 입력의 각진동수이다.

다음으로 스프링과 감쇠기 병렬조합의 전달행렬 (Γ_{kc})은 Table 1에 주어진 각 요소의 전달행렬과 식 (4a)~(4c)를 이용하여 식 (6)과 같이 유도된다.

$$\Gamma_{kc} = \begin{bmatrix} (\alpha_{11})_{kc} & (\alpha_{12})_{kc} \\ (\alpha_{21})_{kc} & (\alpha_{22})_{kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{i\omega}{k + i\omega c} & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

따라서, 이상을 종합하여 전체 L-DAVI 시스템에 대한 전달행렬(Γ_{DAVI})은 Γ_{kc} 와 Γ_L 로부터 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\Gamma_{DAVI} = \begin{bmatrix} (\alpha_{11})_{DAVI} & (\alpha_{12})_{DAVI} \\ (\alpha_{21})_{DAVI} & (\alpha_{22})_{DAVI} \end{bmatrix} \tag{7a}$$

$$(\alpha_{11})_{DAVI} = \frac{(\alpha_{11})_{kc}(\alpha_{21})_L + (\alpha_{21})_{kc}(\alpha_{11})_L}{(\alpha_{21})_{kc} + (\alpha_{21})_L} \tag{7b}$$

$$(\alpha_{12})_{DAVI} = -\frac{(\alpha_{21})_{kc} + (\alpha_{21})_L}{(\alpha_{21})_{kc}(\alpha_{21})_L} + (\alpha_{22})_{DAVI} \frac{(\alpha_{11})_{kc}(\alpha_{21})_L + (\alpha_{21})_{kc}(\alpha_{11})_L}{(\alpha_{21})_{kc}(\alpha_{21})_L} \tag{7c}$$

$$(\alpha_{21})_{DAVI} = \frac{(\alpha_{21})_{kc}(\alpha_{21})_L}{(\alpha_{21})_{kc} + (\alpha_{21})_L} \tag{7d}$$

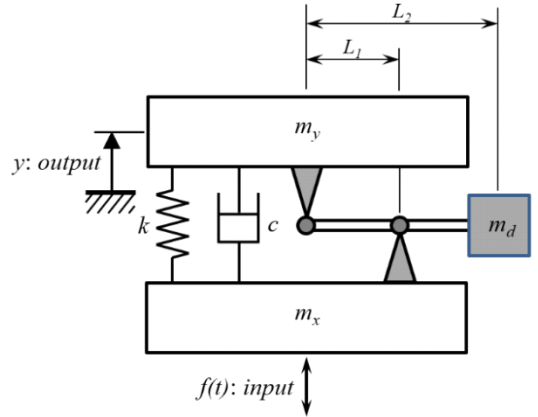


Fig. 4 Model for the validation of transfer matrix for the L-DAVI

Table 2 Specifications of the validation system

Description		Unit	Value	
Base system	Upper base (m_x)	kg	0.158	
	Lower base (m_y)	kg	0.158	
L-DAVI system	Spring (k)	N/m	20,000	
	Damper (c)	Ns/m	7.507	
	Lever isolator	Control mass (m_d)	kg	0.126
		L_1	m	0.023
L_2		m	0.046	

$$(\alpha_{22})_{DAVI} = \frac{(\alpha_{22})_{kc}(\alpha_{21})_L + (\alpha_{21})_{kc}(\alpha_{22})_L}{(\alpha_{21})_{kc} + (\alpha_{21})_L} \tag{7e}$$

3.2 전달행렬의 검증

Γ_{DAVI} 에 대한 타당성은 L-DAVI 시스템을 포함하는 2자유도 불구속 시스템의 응답특성을 검증함으로써 확인하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 이 검증 시스템은 두 질량 m_x 와 m_y 가 L-DAVI 시스템을 통하여 연결되어 있다. L-DAVI 시스템을 포함한 전체 시스템의 기계적인 제원은 Table 2에 제시되어 있다.

이 시스템의 입력단에 단위 조화력이 작용할 때 출력단에 나타나는 가속도의 크기를 Γ_{DAVI} 를 이용한 전달행렬법으로 계산한 다음 그 결과를 전통적인 방법에 의한 결과와 비교함으로써 Γ_{DAVI} 의 타당성을 확인하였다. 전통적 방법에서는 Fig. 4에 주어진 시스템에 대하여 정의된 질량, 감쇠 및 강성 행렬을 이용하여 구하였다.

(1) 전통적 방법

이전 연구에서는 이 시스템과 유사한 시스템을 전통적 방법과 수치해석을 이용하여 분석하였으며 해당 연구에서는 해밀턴의 원리를 이용하여 시스템의 자유진동에 대한 운동방정식을 식 (8)과 같이 유도하였다(6).

$$(m_x + m_d r_l^2) \ddot{x} + m_d (r_l^2 - r_l) \ddot{y} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = f(t) \tag{8a}$$

$$m_d (r_l^2 - r_l) \ddot{x} + (m_y + m_d (r_l^2 - 1)) \ddot{y} + c(x - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \tag{8b}$$

이들 식들은 식 (9a)와 같이 행렬의 식으로 재배열될 수 있으며 질량, 감쇠 및 강성 행렬들은 식 (9b) ~ (9d)와 같이 정의된다.

$$[M] \{\ddot{X}\} + [C] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} = \{F\} \tag{9a}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_x + m_d r_l^2 & m_d (r_l^2 - r_l) \\ m_d (r_l^2 - r_l) & m_y + m_d (r_l^2 - 1) \end{bmatrix} \tag{9b}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \tag{9c}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \tag{9d}$$

검증 시스템의 응답 특성은 위에서 얻어진 행렬들을 바탕으로 다음 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다. 이 식에서 ω 는 가진력 $f(t)$ 의 각진동수이며 $\{X\}$ 와 $\{F\}$ 는 각각 시스템의 변위 및 가진력 벡터이다. Fig. 4에 주어진 시스템의 경우 이 두 벡터는 각각 $\{X\} = \{X \ Y\}^T$ 및 $\{F\} = \{F_1 \ 0\}^T$ 로 표시될 수 있다.

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]) \{X\} = \{F\} \tag{10}$$

(2) 전달행렬법

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 검증 시스템은 두 질량과 L-DAVI 시스템의 직렬연결로 구성되어 있다. 따라서, 검증 시스템의 전체 전달행렬은 Table 1에 제시되어 있는 질량의 전달행렬과 식 (7)로 구할 수 있는 Γ_{DAVI} 를 이용하여 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_{14} = \Gamma_{12} \Gamma_{23} \Gamma_{34} \tag{11a}$$

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{m_x} = \begin{bmatrix} 1 & i\omega m_x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11b}$$

$$\Gamma_{23} = \Gamma_{DAVI} = \begin{bmatrix} (\alpha_{11})_{DAVI} & (\alpha_{12})_{DAVI} \\ (\alpha_{21})_{DAVI} & (\alpha_{22})_{DAVI} \end{bmatrix}_{23} \tag{11c}$$

$$\Gamma_{12} = \Gamma_{m_y} = \begin{bmatrix} 1 & i\omega m_y \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11d}$$

(3) 검증 결과

Fig. 5에 전달행렬을 이용하여 계산된 검증 시스템의 조화응답을 전통적 방법을 이용하여 계산된 결과와 비교 검증하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 방법으로 계산된 검증 시스템 액셀러런스 \ddot{Y}/F 는 주어진 주파수 영역에서 서로 완전히 일치하고 있다. 따라서 앞 장에서 정의된 L-DAVI 시스템의 전달행렬은 이러한 형태의 절연기를 포함한 기계 시스템의 동적인 특성을 예측하는데 충분한 정확도를 가진다고 할 수 있다.

4. 제안된 전달행렬의 적용

이 절에서는 진동 시스템의 전달특성을 개선하기 위하여 L-DAVI 시스템을 적용하는 방법에 대하여 검토한다. L-DAVI 시스템을 이용하여 개선된 진동계의 응답특성을 앞 장에서 유도된 L-DAVI 시스템의 전달

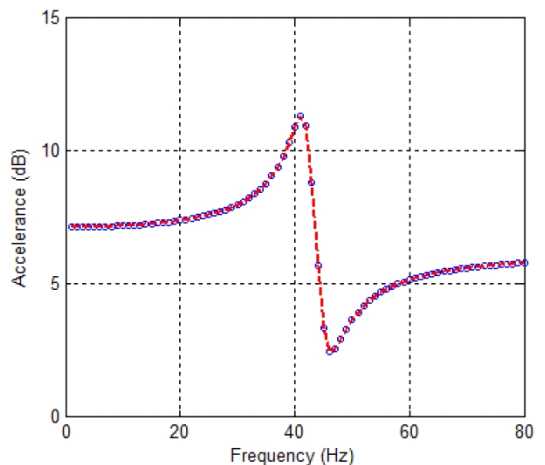


Fig. 5 Harmonic response of the validation system. Key: $\circ \circ \circ$, transfer matrix method; ---, conventional method

행렬(Γ_{DAVI})을 기반으로 전달행렬법을 이용하여 계산하고 이를 원래 진동계의 특성과 비교함으로써 해당 시스템의 효과를 분석한다. 또한 전달 특성의 개선이 필요한 목표 주파수 영역에 대하여 적용할 L-DAVI 시스템의 최적화를 검토한다. 이 과정에서 전달행렬법을 통하여 계산된 시스템 응답특성을 기준으로 해당 주파수 영역에서 최대 효과를 제공하는 L-DAVI 시스템의 최적위치와 구성을 검토한다.

4.1 대상 시스템

이 절의 연구의 대상 시스템인 4자유도 진동시스템의 구성이 Fig. 6에 제시되어 있다. 또한 대상 시스템의 기계적인 제원은 Table 3에 주어져 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이 시스템은 비구속 4자유도 시스템으로 3개의 '0'이 아닌 고유진동수를 가진다. 시스템의 고유진동 특성을 식(10)에 제시된 전통적 방법을 이용하여 조사하였다.

이렇게 얻어진 3개의 고유진동수와 각각에 해당하는 고유진동 모드가 Fig. 7에 주어져 있다.

또한 m_1 에 가해진 조화 가진력에 의해 m_4 에 나타나는 수평방향 가속도를 전달행렬법을 이용하여 계산하였다. 대상 시스템 내의 질량들에 대한 전달행렬을 Table 1에 주어진 식을 이용하여 정의하였다. 또한 스프링과 감쇠기의 병렬연결로 구성되어 있는 각 질량들 사이의 연결부에 대한 전달행렬은 식(6)을 이용하

여 구하였다. 따라서, m_1 의 입력단과 m_4 의 출력단 사이의 전체 전달행렬(Γ_{18})은 다음 식(12)와 같이 구할 수 있다. 식에서 알 수 있는 바와 같이 Γ_{18} 은 시스템을 구성하고 있는 각 요소에 대한 7개의 전달행렬을 연속적으로 곱한 행렬로 나타난다. 예를 들어 Γ_{67} 은 k_{34} 와 c_{34} 의 병렬연결에 대한 전달행렬이며 Γ_{78} 은 m_4 에 대한 전달행렬이다.

$$\Gamma_{18} = \Gamma_{12}\Gamma_{23}\Gamma_{34}\Gamma_{45}\Gamma_{56}\Gamma_{67}\Gamma_{78} \tag{12a}$$

$$\Gamma_{(2i-1)(2i)} = \Gamma_{m_i} = \begin{bmatrix} 1 & i\omega m_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{12b}$$

$$\Gamma_{(2j)(2j+1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{i\omega}{k_{(2j)(2j+1)} + i\omega c_{(2j)(2j+1)}} & 1 \end{bmatrix} \tag{12c}$$

위의 행렬을 이용하여 계산된 \ddot{Y}/F 가 다음 Fig. 8에 주어져 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Fig. 7에 제시된 시스템의 고유진동수들에 해당하는 3개의 피크가 뚜렷하게 나타난다.

4.2 L-DAVI 시스템 적용

이 절에서는 Fig. 8에 제시되어 있는 대상 시스템의 \ddot{Y}/F 를 개선하기 위하여 L-DAVI 시스템을 적용하는 방안에 대하여 검토한다. 이 연구의 세부 목적은 L-DAVI 시스템을 적용함으로써 세 번째 및 네

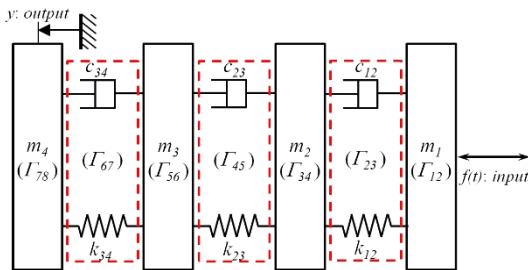


Fig. 6 The target system of the lever type isolator

Table 3 Specifications of the target system

Mass (kg)	Spring (N/m)		Damper (Ns/m)		
m_1	0.428	k_{12}	1864.4	c_{12}	0.681
m_2	0.035	k_{23}	4665.4	c_{23}	0.184
m_3	0.029	k_{34}	4433.2	c_{34}	0.930
m_4	11.013	-	-	-	-

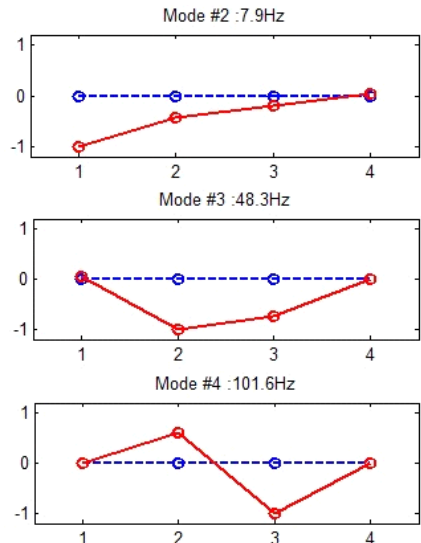


Fig. 7 Natural frequencies and vibration modes of the target system

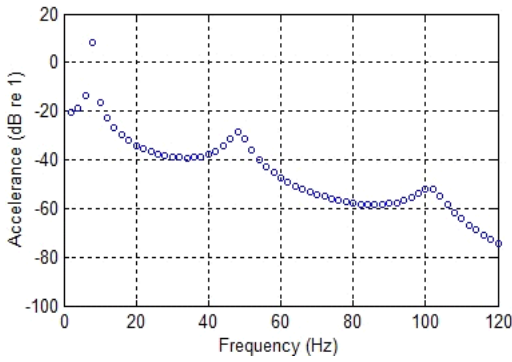


Fig. 8 System acceleration \ddot{Y}/F of the target system obtained by TMM

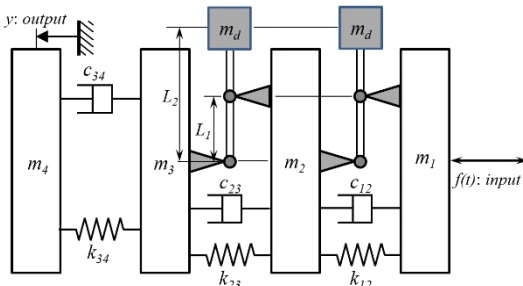


Fig. 9 Target system with the double L-DAVI system

번째 고유진동수 주변 \ddot{Y}/F 를 저감하는 것이다. 따라서 서로 분리되어 있는 두 주파수 영역에서 반공진 특성을 도입할 수 있는 두 개의 L-DAVI 시스템을 적용할 필요가 있다. 위에서 제시된 방안에 따라 개선된 시스템을 다음 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 두 개의 레버형 절연기가 1) m_1 과 m_2 의 연결부 2) m_2 과 m_3 의 연결부에 각각 적용되어 있다. 또한 적용된 절연기의 제원은 다음 Table 4에 제시되어 있다. 표에 주어진 제원은 각 변수에 대한 영향 분석을 통하여 결정하였다.

아울러 위에서 설명된 바와 같이 시스템이 수정됨에 따라 식 (12a)~(12c)에 주어진 시스템의 전달행렬 중 절연기가 추가된 부분에 해당하는 행렬을 다음 식 (13a), (13b)와 같이 수정하여야 한다.

$$\Gamma_{23} = \begin{bmatrix} (\alpha_{11})_{DAVI} & (\alpha_{12})_{DAVI} \\ (\alpha_{21})_{DAVI} & (\alpha_{22})_{DAVI} \end{bmatrix}_{23} \tag{13a}$$

$$\Gamma_{45} = \begin{bmatrix} (\alpha_{11})_{DAVI} & (\alpha_{12})_{DAVI} \\ (\alpha_{21})_{DAVI} & (\alpha_{22})_{DAVI} \end{bmatrix}_{45} \tag{13b}$$

Table 4 Specifications of modified lever isolator

Description		Unit	Value
Lever isolator I	Control Mass (m_d)	kg	0.010
	L_1	m	0.023
	L_2	m	0.046
Lever isolator II	Control Mass (m_d)	kg	0.010
	L_1	m	0.023
	L_2	m	0.039

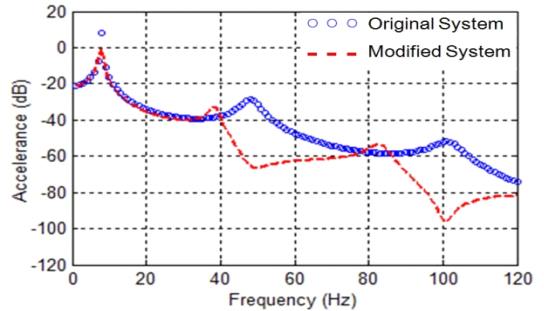


Fig. 10 Effect of the double L-DAVI on \ddot{Y}/F of the target system

두 개의 L-DAVI 시스템을 적용한 위의 진동계의 \ddot{Y}/F 를 식 (12)와 (13)에 설명되어 있는 전달행렬을 이용하여 계산하였다. Fig. 10에 이렇게 얻어진 결과를 원래 시스템의 \ddot{Y}/F 와 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 L-DAVI 시스템의 반공진 효과로 인해 세 번째 및 네 번째 고유진동수 주변의 \ddot{Y}/F 가 크게 저감되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 L-DAVI 시스템에 대한 벡터형 4단 정수(전달행렬)를 유도하였다. 유도된 전달행렬을 적용한 전달행렬법으로 계산된 간단한 검증 시스템의 응답특성을 전통적 방법을 이용한 결과와 비교함으로써 유도된 전달행렬이 L-DAVI 시스템을 포함한 진동계의 진동 전달특성을 계산하는데 충분한 정확도를 갖고 있음을 확인하였다.

다음으로 비교정 4자유도 시스템을 대상으로 L-DAVI 시스템을 적용하여 입력단과 출력단 사이의 액셀러런스 \ddot{Y}/F 를 감소시키는 방법을 검토하였다. 이전 단계에서 유도된 L-DAVI 시스템의 전달행렬을

이용한 전달행렬법으로 개선 시스템의 \ddot{Y}/F 를 계산하였다. 또한 최적의 시스템 구성과 위치도 동일한 방법을 이용하여 검토하였다. 개선 전, 후 시스템의 \ddot{Y}/F 를 비교를 통하여 L-DAVI 시스템을 적용함으로써 시스템의 응답 특성을 획기적으로 개선할 수 있음을 확인하였다.

또한, 이 연구에서 유도된 L-DAVI 시스템의 전달행렬에 기반한 전달행렬법을 이용하여 해당 시스템을 포함한 진동계의 응답 특성을 효과적이고 정확하게 분석할 수 있음을 알 수 있다.

향후 연구에서는 회전 진동의 응답특성을 개선하기 위한 반공진 댐퍼 시스템에 대한 전달행렬 유도와 그 활용에 대한 연구도 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0020089)

References

- (1) Kwag, D. G., Bae, J. S., Hwang, J. H. and Kim, H. S., 2011, An Experimental Study on the Vibration Absorber for Vibration Attenuation of Cantilever Beam Structure, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 991~996.
- (2) Lee, D. O. and Han, J. H., 2007, A Comparison of Vibration Isolation Characteristics of Various Forms of Passive Vibration Isolator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 817~824.
- (3) Flannelly, W. G., 1967, Dynamic Anti-resonant Vibration Isolator, U.S. Patent No 3,322,379.
- (4) Yilmaz, C. and Kikuchi, N., 2006, Analysis and Design of Passive Band-stop Filter-type Vibration Isolators for Low-frequency Applications, Journal of Sound and Vibration, Vol. 291, No. 3, pp. 1004~1028.
- (5) Li, K. and Gohnert, M., 2010, Lever Mechanism for Vibration Isolation, Applied Technologies & Innovations, Vol. 1, No. 1, pp. 21~28.
- (6) Yun, J. H., Kim, G. W and Lee, H., 2016, Study

on Performances of the Lever Type Anti-resonance Vibration Isolator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 187~194.

(7) Snowdon, J. C., 1971, Mechanical Four-pole Parameter and Their Application, Journal of Sound and Vibration, Vol. 15, No. 3, pp. 307~323.

(8) Ha, J. Y. and Kim, K. J., 1994, Analysis of Mimo Mechanical Systems Using the Vectorial Four Pole Parameter Method, Ph. D. Thesis, Korean Advanced Institute of Technology.

(9) Ha, J. Y. and Kim, K. J., 1995, Analysis of Mimo Mechanical Systems Using the Vectorial Four Pole Parameter Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 180, No. 2, pp. 333~350.

(10) Attar, M. A., 2012, Transfer Matrix Method for Free Vibration Analysis and Crack Identification of Stepped Beams with Multiple Edge Cracks and Different Boundary Conditions, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 57, No. 1, pp. 19~33.

(11) Lee, J. W. and Lee, J. Y., 2016, Development of a Transfer Matrix Method to Obtain Exact Solutions for the Dynamic Characteristics of a Twisted Uniform Beam, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 105, pp. 215~226.



Jong-Hwan Yun received M.S. in mechanical engineering from Inha University in 2010. He is a professor in Dept. of Automobile, Yeosu Institute of Technology. His research interests are simulation and experiment of the automotive NVH.



Hyeongill Lee, Ph.D. in mechanical engineering and Associate Professor in School of Automotive Engineering, Kyungpook National University. Prof. Lee is teaching Dynamics, Automatic Control and Mechanical Vibration, etc. He has academic interests in automotive NVH, Brake squeal, Sound radiation from vibrating structures, etc.