

교량 바닥판의 다중모드 진동 저감을 위한 2자유도 진동흡진기

2DOF Vibration Absorber for Multi-mode Vibration Reduction of Bridge Deck

김인호* · 장선준†
In-Ho Kim* and Seon Jun Jang†

(Received March 21, 2022 ; Revised April 26, 2022 ; Accepted April 27, 2022)

Key Words : 2DOF Vibrating Body(2자유도 진동체), Dynamic Vibration Absorber(진동흡진기), Multi-mode (다중모드)

ABSTRACT

Vibrations that impact bridges need to be addressed because they can cause problems in terms of serviceability and structural safety. Therefore, the serviceability standards for vibration are considered by performing wind resistance design and loading tests. This study proposes a two-degree-of-freedom (2DOF) dynamic absorber that reduces the multi-mode vibrations of a bridge deck affected by wind load. The bridge decks have multi-mode vibration characteristics because various forces such as drag, lift, and moment are generated under the influence of wind loads. Therefore, a dynamic model is constructed and the parameters of the reduced model are used. In addition, the design formula for a single rigid 2DOF dynamic absorber is proposed to reduce vibrations occurring at two resonant frequencies acting on the bridge deck. Finally, the performance is confirmed by numerical simulations. In addition, it was shown that the vibration damping performance of the proposed dynamic absorber was affected by the radius of gyration as well as the mass ratio.

1. 서 론

교량 구조물의 과도한 진동이나 처짐은 교량의 사용성을 저하시키고 구조물의 안전성에 문제를 야기하게 된다. 또한 반복적으로 작용하는 하중의 경우 포장면의 파손과 부재의 피로 문제를 발생시켜 보행자 및 차량 운전자에게 불안감을 느끼게 한다⁽¹⁻³⁾. 따라서 교량 구조물의 진동을 저감시키기 위한 다양한 연구들이 수행되었다.

교량과 같은 대형 구조물에서는 가격이 저렴하고 간단한 수동 제어 장치인 진동흡진기에 대한 고려가 일반적이다. 진동흡진기의 기본적인 메커니즘은 진동흡진기의 공진주파수가 대상 구조물의 공진주파수에 인접하도록 하는 것이다⁽⁴⁻⁶⁾. 단자유도 형태의 진동흡진기는 차량 하중에 의한 교량의 진동에 대해 효과가 검증되었다. 그러나 풍하중에 의한 교량의 진동은 양력, 항력, 그리고 모멘트의 영향을 받기 때문에 다중모드를 가지게 되어 기존 진동흡진기로 효과적인 진동 저감이 어렵다. 다양한 모드의 진동 저감을 위해

† Corresponding Author ; Member, Division of Mechanical and Automotive Engineering, Hoseo University, Professor
E-mail : mweagle@hoseo.edu

* Member, Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University, Professor

‡ Recommended by Editor Yong Hee Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

Kwon⁽⁷⁾은 다중 단자유도 동조 질량 감쇠기 조합을 제안하고 상호 작용을 고려한 운동방정식을 도출하였다. Park 등⁽⁸⁾은 선형 및 회전자유도 진동흡진기를 복합적으로 사용하면 다중모드를 효율적으로 저감시킬 수 있음을 보였다. Zuo and Nayfeh⁽⁹⁾는 단일모드 제진을 위한 2자유도 진동흡진기를 제안하였으며 동일한 질량을 가지는 단자유도 진동흡진기에 비해 보다 뛰어난 성능을 가짐을 증명하였다.

나선(screw)은 Ball⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 기하요소(entity)이다. Dimentberg⁽¹¹⁾는 나선을 이용하여 탄성적으로 지지된 단일강체의 운동방정식을 표현하였으며 Blanchet⁽¹²⁾은 나선이론을 이용해 표현한 연성된 다자유도 단일강체의 진동모드의 기하학적 의미를 규명하였다. Jang and Choi⁽¹³⁾는 두 개의 공간 진동체가 탄성체에 의해 직렬로 연결되어있는 경우 두 번째 물체가 다중모드 진동흡진기로 작동하는 조건을 연구하였다.

구조물의 다중 진동 모드를 기존 연구에서와 같이 복수의 진동흡진기 대신 단일 강체 2자유도 진동흡진기를 이용하여 제어할 수 있다면 보다 효율적인 다중모드 진동 저감이 가능하다. 이 연구에서는 나선이론을 이용하여 2개의 평면상의 강체로 구성된 진동계를 모델링한 후 다중 모드 제어를 위한 단일강체 2자유도 진동흡진기의 설계식을 제안하였다. 수치 예를 통해 풍하중의 영향을 받는 교량 바닥판이 갖는 2개의 모드를 제어할 수 있음을 보였다.

2. 설계 이론 및 수치 예

2.1 교량 바닥판의 강체 모델링

풍하중을 받는 구조물이 바람 방향 1차 모드 고유진동수가 1 Hz를 초과하거나 박스 내부의 단면 형상을 유지하기 위한 구조 부재가 적절히 설치된 경우에는 단면 비틀림에 대해 강체로 가정할 수 있다⁽¹⁴⁾. 따라서 풍하중을 받는 구조물에 대한 해석 및 실험에서 강체 모형을 많이 고려한다. Fig. 1은 Helgedagsrud 등⁽¹⁵⁾의 연구에서 제시된 교량바닥판의 동역학 모델을 나타내고 있다. 교량바닥판은 질량이 m 이며 관성모멘트가 J 인 단일 강체로 모델링되었으며 교각과 바닥판을 연결하는 탄성체는 상하대칭 형태의 4개의 선형 스프링으로 모델링되었다. 선형 스프링들은 각각 무게중심으로부터의 거리가 r_1 과 r_2 인 지점에 위치해 있으며 강성은 모두 동일하게 k 로 하였다. Fig. 1의 교량바닥판은 평면상에

서 총 3개의 자유도를 갖게 되며 각 자유도의 운동은 서로 연성되어 있다. 기준점이 무게중심(C)과 일치할 경우 4개의 선형스프링들을 각각 선벡터(line vector)로 표현하여 구성한 자코비안 행렬은 식 (1)과 같다.

$$j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ r_1 & r_1 & -r_2 & -r_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

식 (1)을 이용하여 미소 변위에 대한 강성행렬은 식 (2)와 같이 얻을 수 있다⁽¹⁶⁾.

$$K_C = kjj^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4k & 2k(r_1 - r_2) \\ 0 & 2k(r_1 - r_2) & 2k(r_1^2 + r_2^2) \end{bmatrix} \tag{2}$$

기준점에서 나타낸 관성행렬은 식 (3)과 같이 대각화된 형태로 나타낼 수 있다.

$$M_C = \text{diag}(m, m, J) \tag{3}$$

교량바닥판이 Ω 의 주파수로 미소 조화운동을 할 경우 변위는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \hat{X}e^{j\Omega t} \tag{4}$$

여기서 $\hat{X} = [\delta_x, \delta_y, \phi]^T$ 이며 δ 와 ϕ 는 각각 선형 및 회전 변위의 크기를 의미한다. 식 (2)와 (3)의 강성, 관성행렬로부터 운동방정식을 구성하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$(K_C - \Omega_i^2 M_C)\hat{X}_i = 0 \tag{5}$$

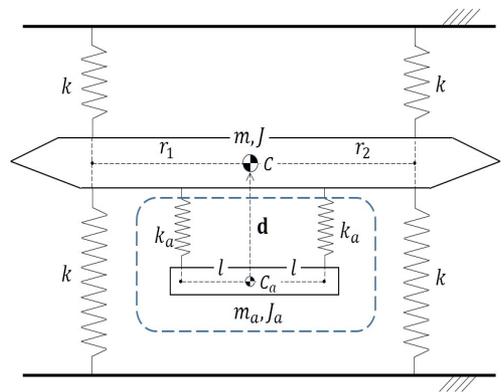


Fig. 1 Modeling of the bridge deck with 2DOF tuned mass damper

식 (5)로부터 3개의 공진주파수 Ω_i 와 공진모드 \hat{X}_i 를 얻을 수 있는데, 이중 강성행렬의 형태로 인해 1개의 강체 모드가 발생하므로 Fig. 1의 단일 강체 구조물은 2개의 공진주파수 및 공진 모드를 갖게 된다.

2.2 진동흡진기 설계

이 연구에서는 교량바닥판의 2개의 공진주파수에서 발생하는 공진모드를 억제하기 위한 단일강체 2자유도 진동흡진기의 설계식을 제시하고자 한다. Fig. 1의 점선부분 안에 표현되어 있는 2자유도 진동흡진기는 질량 m_a 와 관성모멘트 J_a 를 갖는 강체와 수직방향으로 무게중심으로부터 l 인 지점에 설치되어 있는 강성 k_a 인 2개의 선형 스프링으로 구성되어 있다. 진동흡진기의 무게중심(C_a)을 기준점으로 할 때 앞 절과 동일한 방법으로 진동흡진기의 강성행렬 및 관성행렬을 구하면 식 (6), (7)과 같다.

$$K_{C_a}^a = \text{diag}(0, 2k_a, 2k_a l^2) \tag{6}$$

$$M_{C_a}^a = \text{diag}(m_a, m_a, J_a) \tag{7}$$

식 (6)과 (7)의 강성 및 관성행렬은 모두 대각화된 형태이므로 병진 및 회전 운동은 모두 비연성(decouple)되어 있으며 식 (6)과 (7)를 (5)에 대입하고 진동흡진기의 관성모멘트를 $J_a = m_a \rho^2$ 로 두면 식 (8)과 같은 진동흡진기의 공진주파수식을 간단히 얻을 수 있다.

$$\Omega_{a,1} = \sqrt{\frac{2k_a}{m_a}}, \quad \Omega_{a,2} = \frac{l}{\rho} \sqrt{\frac{2k_a}{m_a}} \tag{8}$$

여기서 ρ 는 진동흡진기의 관성반경(radius of gyration)이다. 진동흡진기의 경우도 강성행렬의 형태로 인해 3개의 공진모드 중 1개는 강체모드이다. 식 (8)에서 볼 수 있듯이 두 개의 공진주파수는 진동흡진기의 질량과 강성의 비율 및 선형 스프링의 위치와 관성반경의 비율에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

2.3 진동흡진기 작동 조건

2자유도 진동흡진기를 부착하고자 하는 교량바닥판에는 통행 하중 및 바람에 의한 풍하중이 작용하게 되며 이로 인한 진동이 발생하게 된다. Fig. 1과 같이 교량바닥판과 진동흡진기가 결합되어 있는 2 물체계의 운동방정식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$M_C \ddot{X} + K_C X + K_C^a (X - X^a) = w \tag{9a}$$

$$M_C^a \ddot{X}^a + K_C^a (X^a - X) = 0 \tag{9b}$$

여기서 X^a 는 진동흡진기의 변위이고, K_C^a 및 M_C^a 는 교량바닥판의 무게중심에서 표현한 진동흡진기의 강성 및 관성행렬로서 $K_C^a = E_{C_a C}^T K_{C_a}^a E_{C_a C}$ 및 $M_C^a = E_{C_a C}^T M_{C_a}^a E_{C_a C}$ 관계로부터 얻을 수 있다. 평면 평행축 합동변환(parallel axis congruence transformation) 행렬은 식 (10)과 같다.

$$E_{C_a C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d_y \\ 0 & 1 & -d_x \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

조화가진을 가정하고 가진 주파수가 Ω 이라고 할 때 가진벡터 w 는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \hat{w} e^{j\Omega t} \tag{11}$$

여기서 $\hat{w} = [f_x, f_y, m_z]^T$ 이며 f 와 m_z 는 각각 평면 힘 및 평면 모멘트를 의미한다. 식 (4)와 (11)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$K_C \hat{X} + K_C^a (\hat{X} - \hat{X}^a) - \Omega^2 M_C \hat{X} = \hat{w} \tag{12a}$$

$$K_C^a (\hat{X}^a - \hat{X}) - \Omega^2 M_C^a \hat{X}^a = 0 \tag{12b}$$

식 (11)에서 \hat{X}^a 를 소거하여 정리하면 식 (13)과 같다.

$$(K_C - E_{C_a C}^T Z_{C_a} E_{C_a C} - \Omega^2 M_C) \hat{X} = \hat{w} \tag{13}$$

이때, $Z_{C_a} = K_{C_a}^a (K_{C_a}^a - \Omega^2 M_{C_a}^a)^{-1} K_{C_a}^a - K_{C_a}^a$ 이며, 이를 전개하면 식 (14)와 같이 정리할 수 있다.

$$Z_{C_a} = \frac{1}{\Delta} \text{diag}(0, 2k_a \Delta_2, 2k_a l^2 \Delta_1) \tag{14}$$

여기서 $\Delta_i = (\Omega_{a,i}^2 - \Omega^2) / \Omega^2$, $\Delta = \Delta_1 \Delta_2$ 이다. 가진 주파수가 진동흡진기의 공진주파수 중 하나에 접근하게 되면 Δ 는 0에 수렴하며 이때 식 (14)는 식 (15)와 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$E_{C_a C}^T \tilde{Z}_{C_a} E_{C_a C} \hat{X} = 0 \tag{15}$$

여기서 $\tilde{Z}_{C_a} = \Delta Z_{C_a}$ 이다. 식 (15)를 전개하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2k_a\Delta_2 & -2k_a\Delta_2d_x \\ 0 & -2k_a\Delta_2d_x & 2k_a l^2 \Delta_1 + 2k_a\Delta_2d_x^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \phi \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

$\Omega = \Omega_i$ ($i = 1, 2$)일 때 식 (16)은 각각 축약된 형태로 나타낼 수 있다.

$$\delta_y + d_x\phi = 0 \quad \text{at } \Omega = \Omega_1 \quad (17a)$$

$$\phi = 0 \quad \text{at } \Omega = \Omega_2 \quad (17b)$$

식 (17a)에서 $\Omega = \Omega_1$ 일 때 변위 δ_y 와 ϕ 가 연성된 형태로 나타나게 되며 흡진이 이루어지지 않게 된다. 따라서 2자유도 진동흡진기의 2개의 공진주파수들, 즉 Ω_1, Ω_2 를 모두 활용하여 교량바닥판의 변위를 제어하기 위해서는 $d_x = 0$ 인 조건이 만족되어야 한다. 이는 진동흡진기의 무게중심의 수평위치가 교량바닥판의 무게중심의 수평위치가 일치해야 함을 의미한다. 만일 이러한 조건이 만족되지 않을 경우 교량바닥판의 변위는 $\Omega = \Omega_1 = \Omega_2$ 인 경우, 즉 하나의 공진주파수에서만 제어될 수 있다.

Table 1 Properties of small scale bridge deck

Property	Value
Mass	5.120 kg
Moment of Inertia	0.08295 kgm ²
First resonant frequency	5.0087 rad/s
Second resonant frequency	12.6351 rad/s
Frequency ratio	2.52

Table 2 Calculated properties of the bridge deck

Property	Value
Position of the 1 st spring, r_1	98.5 mm
Position of the 2 nd spring, r_2	15.5 mm
Stiffness, k	181 N/m

Table 3 Properties of 2DOF vibration absorber

	Property	Value
Free selection	Mass ratio, μ	0.1
	Radius of gyration, ρ	56 mm
Calculation	Stiffness, k_a	6.42 N/m
	Position of the springs, l	141 mm

2.4 수치 예

Table 1은 교량바닥판 축소모형의 설계변수 및 진동 특성이다⁽¹⁵⁾. 축소모형은 5.0087 rad/s, 12.6351 rad/s의 2개의 공진주파수를 가지며 각각 수직병진 및 회전 모드를 나타낸다. 축소모형은 실스케일 모델과 공진주파수들의 비율이 일치되도록 설정되었다. Fig. 1과 같은 형태를 가지며 Table 1와 동일한 질량과 관성모멘트 및 진동주파수를 갖는 진동시스템은 Park and Jang⁽¹⁷⁾이 제안한 방법으로부터 Table 2와 같이 합성할 수 있다. 이 연구에서 제안하는 2자유도 진동흡진기는 Table 1의 공진주파수들을 식 (8)과 (17)에 따라 2자유도 진동흡진기의 2개의 공진주파수들과 각각 일치시켜 공진 모드를 소거할 수 있다. 진동흡진기의 질량과 교량바닥판 질량의 비율(μ)이 0.1이며 진동흡진기의 관성반경(ρ)이 56 mm이라고 할 때, 식 (8)로부터 진동흡진기의 설계변수들을 구하면 Table 3과 같다.

설계된 2자유도 진동흡진기의 성능을 평가하기 위해 모드 해석을 수행하였다. 전체 계에 대한 관성 및 강성행렬을 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{\mathbf{M}}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_C & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_C \end{bmatrix}, \overline{\mathbf{K}}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_C + \mathbf{K}_C^a - \mathbf{K}_C^a \\ -\mathbf{K}_C^a & \mathbf{K}_C^a \end{bmatrix} \quad (18)$$

식 (18)의 행렬로부터 얻은 모드 벡터들의 행렬을 $\Psi = [\Phi \ \Phi^a]^T$ 라 할 때, 식 (19)를 이용해 주파수 응답을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}} \\ \hat{\mathbf{X}}^a \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^6 \frac{\begin{bmatrix} \Phi_r \\ \Phi_r^a \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{W}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_r \\ \Phi_r^a \end{bmatrix}}{(1 + j\beta\Omega)k_r - \Omega^2 m_r} \quad (19)$$

여기서 k_r, m_r 은 각각 $\Psi^T \overline{\mathbf{K}}_C \Psi, \Psi^T \overline{\mathbf{M}}_C \Psi$ 의 r 번째 원소이다. 또한 β 는 비례감쇠계수이다. 식 (19)를 이용하여 구한 주파수 응답선도를 Fig. 2에 나타내었다. 녹색 점선은 진동흡진기를 적용하기 전 $\beta=0.5\%$ 인 경우의 응답이며 적색 파선은 진동흡진기를 적용한 경우의 비감쇠 응답을 나타낸다. 흑색 실선은 진동흡진기를 적용하고 $\beta=0.5\%$ 인 경우의 응답이다. 2자유도 진동흡진기에 의해 교량바닥판의 2개의 모드가 동시에 제어되는 것을 확인할 수 있다. 2자유도 진동흡진기의 성능은 기존의 단자유도 시스템과 달리 진동흡진기와 흡진 대상물체의 질량비(μ) 뿐만 아니라 진동흡진기의 관성반경(ρ)에도 영향을 받게 된다. Fig. 3은 질량비 및 관성반경을 각각 변경하였을 경우의 교

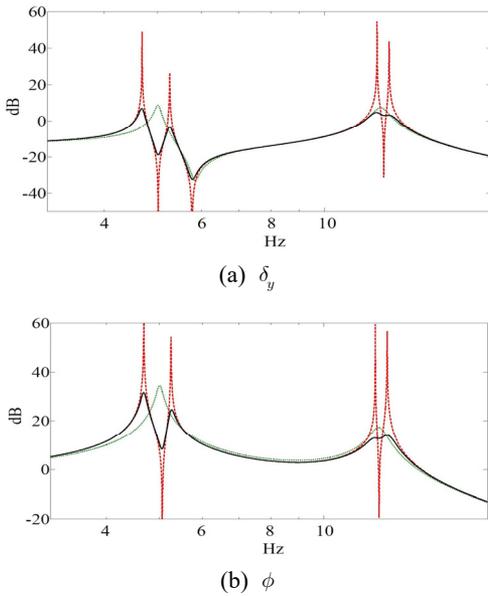


Fig. 2 Frequency response of bridge deck without 2DOF absorber (green dotted), with 2DOF absorber (red dashed), and with damped absorber (black solid)

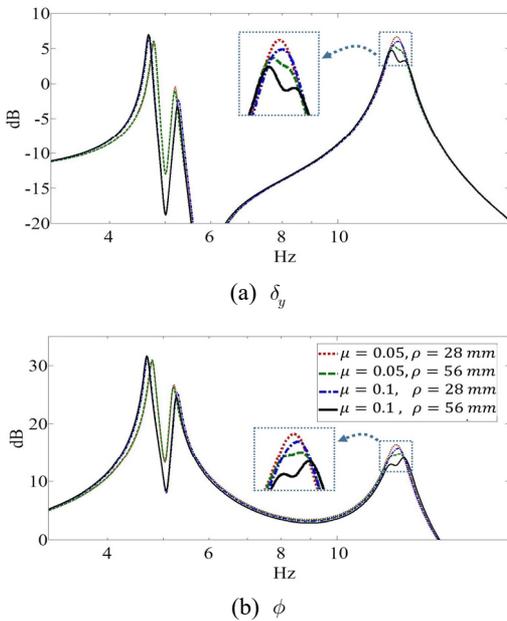


Fig. 3 Frequency response of bridge deck when $\mu = 0.05$ and $\rho = 28$ mm (red dotted), $\mu = 0.05$ and $\rho = 56$ mm (green dashed), $\mu = 0.1$ and $\rho = 28$ mm (blue dash-dotted), and $\mu = 0.1$ and $\rho = 56$ mm (black solid)

량바닥판의 주파수 응답 특성을 나타내고 있다. 대체적으로 진동제어 성능은 질량비 및 관성반경이 커질수록 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 3의 5 Hz 근처의 응답에서 볼 수 있듯이 질량비가 커질 때 오히려 일부 응답의 크기가 약간 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 식 (17)에서 교량바닥판의 공진주파수와 2자유도 진동흡진기의 공진주파수가 정확히 일치하도록 설계하였기 때문인 것으로 보인다. 즉 제어하고자 하는 교량바닥판의 공진주파수와 2자유도 진동흡진기의 공진주파수 간의 약간의 차이가 있을 경우 보다 효율적인 제어가 가능할 수 있는 것으로 보이며 여기에 관한 최적화 연구를 추후 진행하고자 한다.

3. 결 론

이 연구에서는 풍하중의 영향을 받는 교량 바닥판의 다중모드 진동 저감을 위한 2자유도 진동흡진기의 설계 및 성능 검증 연구를 수행하였다. 2자유도 진동흡진기의 설계식을 제안하였으며 진동흡진기 적용 시 나타나는 교량바닥판 상사모델의 진동 특성을 수치예를 통해 보였다. 그 결과 상사모델의 2개의 모드들을 제안된 2자유도 진동흡진기가 효과적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있었으며 단일 모드 진동흡진기 설계시 고려되는 질량비와 더불어 관성반경이 중요한 설계변수로 작용하는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2020학년도 군산대학교 신입교수 연구비 지원과 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2020R111A1A01073676)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Kim, N. S. and Jeon, B. G., 2007, Evaluation of Comport Limit on Bridge Vibration, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 161~170.
- (2) Lee, H. S., Ha, S. Y., Hwang, I. H. and Lee, J. S., 2010, A Study on Modeling for Vibration

Serviceability Evaluation, Proceedings of the Computational Structural Engineering Institute Conference, pp. 39~42.

(3) Jeon, G. H., Kim, S. H., Lee, J. H., Lee, S. W., Heo, J. Y., Lee, Y. S. et al., 2000, Development of Evaluation Procedures for Vibration and Displacement Serviceability of Bridges, Final Report TRKO201100007262.

(4) Kwon, H. C., Kim, M. C. and Lee, I. W., 1998, Vibration Control of Bridges under Moving Loads, Computers & Structures, Vol. 66, No. 4, pp. 473~480.

(5) Nam, H., Fujino, Y. and Warnitchai P., 2008, Optimal Tuned Mass Damper for Seismic Applications and Practical Design Formulas, Engineering Structures, Vol. 30, No. 3, pp. 707~715.

(6) Kim, H. T., Cho, N. S. and Seo, J. W., 2010, Experimental Evaluation of Tuned Mass Damper Performance, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 668~669.

(7) Kwon, S. D., 1998, Effectiveness of TMDs for Control of Traffic Induced Bridge Vibrations, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 18, No. 1-4, pp. 457~467.

(8) Park, S. G., Lee, S. B. and Choi, J. H., 2019, Plate Vibration Suppression with Translational and Rotational Dynamic Vibration Absorbers, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 21~29.

(9) Zuo, L. and Nayfeh, S. A., 2006, The Two-degree-of-freedom Tuned-mass Damper for Suppression of Single-mode Vibration under Random and Harmonic Excitation, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 128, No. 1, pp. 56~65.

(10) Ball, R. S., 1900, The Theory of Screws, Dublin: Hodges, Foster.

(11) Dimentberg, F. M., 1965, The Screw Calculus and Its Application in Mechanics, Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Document No. FTD-HT_23-1632-67.

(12) Blanchet, P., 1998, Linear Vibration Analysis Using Screw Theory, Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, US.

(13) Jang, S. J. and Choi, Y. J., 2007, Geometrical

Design Method of Multi-degree-of-freedom Dynamic Vibration Absorbers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 303, No. 1-2, pp. 343-356.

(14) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016, Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design), Sejong: MOLIT.

(15) Helgedagsrud, T. A., Bazilevs, Y., Mathisen, K. M. and Øiseth, O. A., 2019, Computational and Experimental Investigation of Free Vibration and Flutter of Bridge Decks, Computational Mechanics, Vol. 63, No. 1, pp. 121~136.

(16) Griffis, M. and Duffy, J., 1991, Kinematic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement, Journal of Mechanical Design, Vol. 113, No. 4, pp. 508~515.

(17) Park, S. B. and Jang, S. J., 2020, Design Method for the 2DOF Electromagnetic Vibrational Energy Harvester, Smart Structures and Systems, Vol. 25, No. 4, pp. 393~399.



In-Ho Kim received the B.S. and M.S. degrees in Civil Engineering from Sejong University, in 2006 and 2008, respectively and Ph.D. degree in Civil Engineering from KAIST in 2016. He is currently Assistant Professor of Department of Civil Engineering in Kunsan National University. His research interests are structural dynamics for vibrating system, structural health monitoring using IoT sensors and UAV based bridge inspection using image processing and deep learning.



Seon Jun Jang received a B.S., M.S. and Ph.D. degree in Dept. of Mechanical Engineering of Yonsei University in 1999, 2001, and 2007, respectively. He is currently working as an associate professor at Hoseo University. His researches are mainly focused on the design of vibrational energy harvesters using multi coupled degree of freedom vibrating systems and wave energy converters.