

주행질량하의 방진 궤도레일의 동적응답 및 진동특성

Dynamic Response and Vibration Characteristics of an Isolation Rail Track under a Traveling Mass

오 부 진* · 류 봉 조† · 김 종 호** · 이 영 신***

B. J. Oh, B. J. Ryu, J. H. Kim and Y. S. Lee

(2011년 2월 15일 접수 ; 2011년 3월 17일 심사완료)

Key Words : Isolation Rail Track(방진궤도레일), Discrete Support(이산지지), Traveling Mass(주행질량), Runge-Kutta Integration Method(Runge-Kutta적분 방법), Vibration Characteristics(진동특성)

ABSTRACT

This paper presents the dynamic response and the vibration characteristics for a rail-track supported by discrete springs and dampers. Recently, automatic conveyer system, rail-track, rack-master system demand the soundproof facilities and vibration suppression measures in order to satisfy the strict environmental standards. The equations of motions of the dynamic characteristics for a vibration suppression rail-track under a traveling mass were derived by Galerkin's mode summation method considering gravity, centrifugal force, Coriolis force, inertia force of the moving mass, transverse inertia of the rail-track. Also, numerical results were calculated by Runge-Kutta integration method. In order to investigate vibration characteristics and dynamic responses, modal testing and measurement of the responses of the rail-track were performed. Through the experiment and numerical simulations, numerical results have a good agreement with experimental ones.

1. 서 론

오늘날 자동이송장치 및 열차궤도에는 엄격한 환경기준을 만족시키기 위한 방음, 방진 대책의 마련이 필요한 실정이며, 이러한 문제들을 해결하기 위한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있고, 국내에서도 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 주행질량하의 궤도레일의 소음 및 진동을 효율적으로 저감하는 방법으로서 방진 궤도레일을 부설하는 방안이 선진국을 중심으로 폭넓게 채택되고 있으며,

국내에서도 방진 궤도레일에 대한 기술적인 공감대가 크게 확산되어 현장에 적용하고자 하는 많은 노력들이 이루어져 오고 있다.

이러한 주행질량하의 궤도레일 구조물의 단순한 동적거동 문제에 관한 초기의 연구들은 이동하중 문제로 단순화하였으며 주행하중의 크기만을 고려한 구조물의 동적응답과 진동특성을 다루었다^(1,2). 반면에 Stanistic과 Hardin⁽³⁾ 주행질량의 관성력이 고려된 임의의 주행 집중질량들에 의한 단순지지 보의 응답을 해석적으로 연구하였고, Yoshida와 Weaver⁽⁴⁾ 유한요소법을 이용한 수치 해석적 방법을 통하여 이동질량과 이동하중에 의한 보 구조물의 동적응답을 다루었으며 Wilson⁽⁵⁾ 이동분포질량에 의한 단순지지 보의 동적처짐을 반복법을 사용하여 해석하였다. 그 후, Suzuki⁽⁶⁾ 탄성 기초 위에 놓인 보의 동적거동을 가속도가 일정한 주행하중을 받는 경우에 대하여

† 교신저자; 정회원, 한밭대학교 기계공학과
E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr

Tel : (042)821-1159, Fax : (042)821-1587

* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

** 한밭대학교 대학원 기계설계공학과

*** 정회원, 충남대학교 기계설계공학과

연구하였으며 Sadiku와 Leipholz는⁽⁷⁾ 그린 함수 (Green function)를 사용하여 단순하게 하중만을 고려한 이동하중 문제와 질량의 관성효과를 고려한 이동 질량 문제에 대한 해의 차이를 밝혔고, Seiniawska와 Sniady는⁽⁸⁾ 일정한 속도를 갖고 움직이는 불규칙 집 중하중에 의한 보의 동적 응답을 연구하였다. 한편, Humer⁽⁹⁾, Clough와 Penzien은⁽¹¹⁾ 동적해석에 앞서 필요한 고유진동수, 모드 예측을 전통적 유한요소 모델을 사용하여 구하였고, Olsson은⁽¹⁰⁾ 주행물체의 관성력을 무시한다고 가정하여 일정속도의 크기를 갖는 이동하중이 단순지지 보 위를 지날 때의 동적응답을 구하였다. 또한, Lee는⁽¹²⁾ 일정 속도의 주행질량이 외 팔보 구조물과 단순지지 보 구조물을 지날 때 보 구조물과 주행질량이 분리되는 경우의 동적응답과 분리되지 않는 경우의 동적응답을 Runge-Kutta 5차 방법으로 구하였다. 대부분 균일한 단면을 갖는 단순한 보 문제에 대하여 관성효과를 무시한 이동하중의 문제로 취급하였으며 관성효과를 고려했을 때라도 이동 질량의 가속도 성분 중 접촉하고 있는 보의 수직 방향의 가속도항만을 포함하였다. 즉, 균일 단면 보를 대상으로 하여 이동 질량의 동적 효과를 부분적으로만 고려하였다.

그 후, Kim과 그의 공동연구자들은⁽¹³⁾ 이동 질량을 받는 불균일 단면보의 동적응답을 홈의 깊이 및 길이 변화에 따라 수치해석 및 실험을 병행하여 연구하였고, Dugush와 Eisenberger는⁽¹⁴⁾ 이동하중을 받으며 선형적으로 두께가 변하는 불균일 연속보의 진동과 진동 처짐 문제를 수치 해석적으로 연구하였으며 Wu는⁽¹⁵⁾ 보에 작용하는 각각의 이동하중을 이동 질량 요소로 간주하여 이동 질량에 관계된 다양한 요소를 포함한 동적거동 문제를 다루었다. 최근에 Han과 그의 공동연구자들은⁽¹⁶⁾ 이산지지 방진장치를 적용한 철도 슬라브 궤도의 동특성과 이동 질량에 의한 응답을 주행 질량의 속도가 등속도인 경우에 수치 해석적 방법으로 연구하였다. 실제적으로 주행 질량의 보 구조물 진동이나 동특성 해석에는 주행 질량의 가속도 성분은 원심력 방향의 가속도, 코리올리 가속도, 주행 질량의 속도가 균일하지 않을 때 발생하는 수직 방향 가속도, 그리고 접촉하고 있는 보의 수직 방향 가속도항을 모두 고려해야 한다. 따라서 동적하중은 주행 질량의 중력에 의한 정하중 외에 보의 횡 방향 운동과 관련한 관성효과를 모두 포함해야 한다.

따라서 이 논문에서는 스프링-댐퍼로 이산지지된 보 구조물의 동적응답 및 진동특성에 대한 해석을 위하여 주행 질량에 의한 보의 횡 방향 운동으로 발생하는 질량효과에 관련된 모든 가속도항, 즉 중력가속도뿐만 아니라 원심력, 코리올리력과 관련된 가속도, 속도가 균일하지 않을 때 발생하는 수직 방향의 가속도 그리고 접촉하고 있는 보의 수직 방향의 가속도항을 고려하여 수치해석 및 실험 연구 결과를 토대로 고무 스프링과 MR (magneto rheological) 댐퍼를 적용한 이산지지 방진 궤도레일에 대한 동적응답과 진동특성을 연구하는데 그 목적이 있다.

2. 이론 해석

2.1 수학적 모델과 운동 방정식

주행 질량의 스프링-댐퍼로 이산지지된 보 운동의 동적응답 해석을 위한 수학적 모델은 Fig. 1과 같으며 궤도레일을 Bernoulli-Euler 보 구조물로 단순화하여 해석하였으며 보의 정적 처짐은 무시하였다⁽¹⁷⁾.

Fig. 1의 수학적 모델에 대한 운동 지배방정식은 식 (1)에 나타난 바와 같고, 여기서 l 은 보의 길이, m 은 보의 단위 길이 당 질량, ET 은 보의 강성, v 와 a 는 각각 이동 질량 M 의 축 방향 속도와 가속도, $y(x, t)$ 는 보의 횡 방향 변위, x 와 y 는 각각 축 방향과 횡 방향 좌표이다. 이와 같이 제시된 대상 보는 스프링상수 k 와 감쇠계수 c 를 갖는 스프링-댐퍼로 지지되어 있다.

$$\begin{aligned}
 & ET \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \\
 & + \sum_{j=0}^n c_j \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \delta(x - vt) \\
 & = Mg \delta(x - vt) - M \left[\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} v^2 + 2 \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x \partial t} v \right. \\
 & \left. + \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} a + \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \right] \delta(x - vt)
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에 $\xi = \frac{x}{l}$, $v^* = \frac{v}{l}$, $a^* = \frac{a}{l}$ 관계를 적용하면 다음과 같은 무차원 운동 지배방정식으로 표현된다.

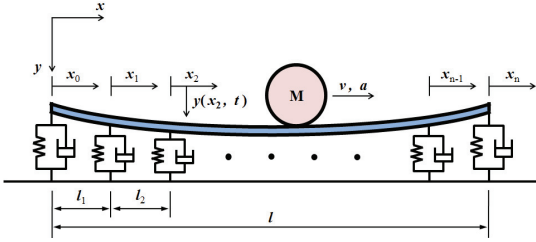


Fig. 1 A mathematical model of a rail-track supported by discrete springs and dampers under a traveling mass

$$\begin{aligned} & \frac{EI}{l^4} \frac{\partial^4 y(\xi, t)}{\partial \xi^4} + m \frac{\partial^2 y(\xi, t)}{\partial t^2} \\ &= \frac{M}{l} \left[g - \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=0}^n c_j \frac{\partial y(\xi, t)}{\partial t} + v^{*2} \frac{\partial^2 y(\xi, t)}{\partial \xi^2} \right. \right. \\ & \left. \left. + 2v^* \frac{\partial^2 y(\xi, t)}{\partial \xi \partial t} + a^* \frac{\partial y(\xi, t)}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 y(\xi, t)}{\partial t^2} \right\} \right] \delta(\xi - v^* t) \end{aligned} \quad (2)$$

대상 보의 경계조건은 이산지지로 식 (3)에 나타난 바와 같다.

$$\begin{aligned} y_0''(0) &= 0, & y_0'''(0) &= \frac{k}{EI} y_0(0) \\ y_0'''(1) &= \frac{k}{EI} y_1(0) + y_1'''(0), & y_0''(1) &= y_1''(0) \\ y_0(1) &= y_1(0), & y_0'(1) &= y_1'(0) \\ y_1'''(1) &= \frac{k}{EI} y_2(0) + y_2'''(0), & y_1''(1) &= y_2''(0) \\ y_1(1) &= y_2(0), & y_1'(1) &= y_2'(0) \\ & \vdots \\ y_n'''(1) &= \frac{k}{EI} y_n(1), & y_n''(1) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)에 대한 동적응답의 해를 구하기 위해 Galerkin의 모드 합 방법(mode summation method)을 이용하면 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$y(\xi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) q_i(t) \quad (4)$$

여기서, i 는 진동모드, j 는 지역좌표 하첨자, n 은 스프링-댐퍼 간격 수를 의미하고 $\phi_{i,j}(\xi_j)$ 는 식 (5)의 일반 형태를 갖는 계의 형상함수(shape function)로 보의 형상 및 경계조건에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \phi_{i,j}(\xi_j) &= C_{i,j} \cos \beta_i \xi_j + C_{i,j} \sin \beta_i \xi_j \\ & \quad + C_{i,j} \cosh \beta_i \xi_j + C_{i,j} \sinh \beta_i \xi_j \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 고유치(eigenvalue) β_i 는 i 번째 고유 각진동수(circular natural frequency) ω_i 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\omega_i^2 = \frac{EI}{m} \left(\frac{\beta_i}{l} \right)^4 \quad (6)$$

식 (5)의 계의 형상함수를 식 (3)의 경계조건에 대입하면 다음과 같은 $4n \times 4n$ 행렬식에 대한 고유치 문제가 된다.

$$[S] \{c\} = 0 \quad (7)$$

식 (4)를 식 (2)의 무차원 운동 지배방정식에 대입하고 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{EI}{ml^4} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}''''(\xi_j) q_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \ddot{q}_i(t) \\ &= \frac{M}{ml} \left[g - \left\{ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n c_j \phi_{i,j}(\xi_j) \dot{q}_i(t) \right. \right. \\ & \quad + v^{*2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}''(\xi_j) q_i(t) \\ & \quad + 2v^* \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}'(\xi_j) \dot{q}_i(t) + a^* \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}'(\xi_j) q_i(t) \\ & \quad \left. \left. + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \ddot{q}_i(t) \right\} \right] \delta(\xi - v^* t) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 $\phi_{i,j}''''(\xi_j) = \beta_i^4 \phi_{i,j}(\xi_j)$ 이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{EI}{ml^4} \beta_i^4 \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) q_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \ddot{q}_i(t) \\ &= \frac{M}{ml} \left[g - \left\{ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n c_j \phi_{i,j}(\xi_j) \dot{q}_i(t) \right. \right. \\ & \quad + v^{*2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}''(\xi_j) q_i(t) \\ & \quad + 2v^* \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}'(\xi_j) \dot{q}_i(t) + a^* \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}'(\xi_j) q_i(t) \\ & \quad \left. \left. + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \ddot{q}_i(t) \right\} \right] \delta(\xi - v^* t) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 $\sum_{j=0}^n \phi_{k,j}(\xi_j)$ 를 내적하고 정리하면 다음과 같은 운동방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_0^1 \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \phi_{k,j}(\xi_j) d\xi_j \right. \\ & \quad \left. + \mu \phi_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \right] \ddot{q}_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{\mu}{M} \sum_{j=0}^n c_j \phi_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \right. \\ & \quad \left. + 2\mu v^* \phi'_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \right] \dot{q}_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{EI}{ml^4} \beta_i^4 \int_0^1 \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \phi_{k,j}(\xi_j) d\xi_j \right. \\ & \quad \left. + \mu v^{*2} \phi''_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \right. \\ & \quad \left. + \mu a^* \phi'_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \right] q_i(t) = \mu g \phi_{k,j}(\xi_M) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $\mu = \frac{M}{ml}$ 로 이동질량과 보 질량의 질량비이며, $\xi_M = v^*t$ 는 이동질량 M 의 위치를 나타낸다.

식 (10)의 운동방정식을 행렬식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$[M(t)] \{\ddot{q}(t)\} + [C(t)] \{\dot{q}(t)\} + [K(t)] \{q(t)\} = \{f(t)\} \quad (11)$$

여기서, 각 행렬요소는 다음과 같다.

$$m_{ij}(t) = \int_0^1 \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \phi_{k,j}(\xi_j) d\xi_j + \mu \phi_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \quad (12)$$

$$c_{ij}(t) = \frac{\mu}{M} \sum_{j=0}^n c_j \phi_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) + 2\mu v^* \phi'_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \quad (13)$$

$$k_{ij}(t) = \frac{EI}{ml^4} \beta_i^4 \int_0^1 \sum_{j=0}^n \phi_{i,j}(\xi_j) \phi_{k,j}(\xi_j) d\xi_j + \mu v^{*2} \phi''_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) + \mu a^* \phi'_{i,j}(\xi_M) \phi_{k,j}(\xi_M) \quad (14)$$

$$f_i(t) = \mu g \phi_{k,j}(\xi_M) \quad (15)$$

3. 수치해석 결과 및 고찰

주행질량에 의한 스프링-댐퍼로 이산지지된 케도 레일의 진동특성 해석은 무차원 매개변수인 스프링

상수 $K^*(= \frac{kl_i^3}{EI})$ 와 감쇠계수 $C^*(= \frac{c}{2\sqrt{mk}})$ 를 변화시켜가며 Runge-Kutta의 적분 방법을 사용하여 운동 특성에 대한 경향을 조사하였다⁽¹⁶⁾.

Fig. 2는 실험과 수치시뮬레이션에 적용된 시간변화에 따른 주행질량의 속도 프로파일을 나타낸다.

Fig. 3(a)~(f)는 주행질량과 보의 질량비 $\mu=1/15$, 무차원 감쇠계수 $C^*=100$ 으로 고정시키고 주행질량의 속도는 Fig. 2에 나타난 속도 변화 함수를 입력한 경우에 대하여 무차원 스프링상수 K^* 값을 변화시켜가며 각각 보 구조물의 선단($\xi_M=0.1$), 중간($\xi_M=0.5$) 및 끝단($\xi_M=0.9$)에서의 시간변화에 따른 보의 동적거동을 나타낸 그림이다. K^* 값이 0.1 일 때, 동적 처짐이 가장 큰 형태로 나타나며, K^* 값이 0.1에서 1.0으로 증가함에 따라 동적 처짐 및 속도가 현저히 감소되는 경향을 보이고 있다. 또한, 동적 처짐은 중간점에서 최대가 되고, 선단에서 최소가 되는 경향을 보이며, 속도는 끝단에서 최대가 되고, 선단에서 최소가 되는 결과가 나타났다.

Fig. 4(a)~(f)는 주행질량과 보의 질량비 $\mu=1/15$, 무차원 스프링 상수 $K^*=0.1$ 로 고정시키고, 주행질량의 속도는 Fig. 2에 나타난 수치대로 입력한 경우에 대하여 무차원 감쇠계수 C^* 값을 변화시켜가며 각각 보 구조물의 선단($\xi_M=0.1$), 중간($\xi_M=0.5$) 및 끝단($\xi_M=0.9$)에서의 시간변화에 따른 보의 동적거동을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 0을 제외한 C^* 값이 10일 때, 동적 처짐이 가장 큰 형태로 나타

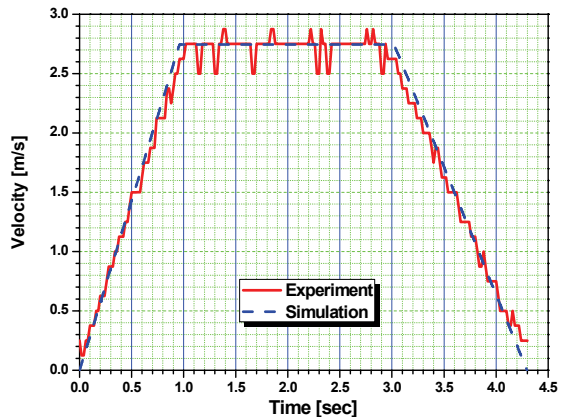
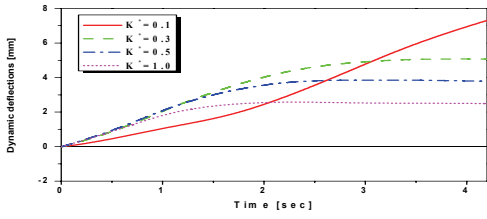
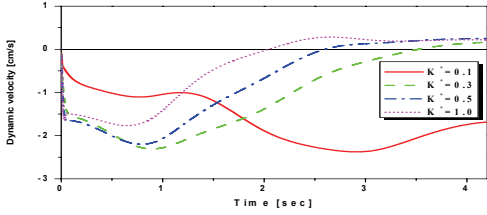


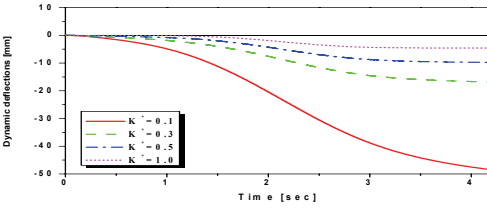
Fig. 2 Velocity profiles of a moving mass according to time variation



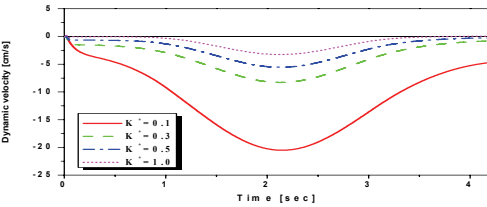
(a) Dynamic deflections at the start position



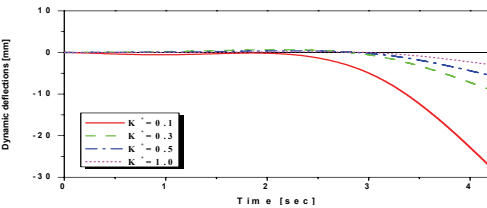
(b) Dynamic velocity at the start position



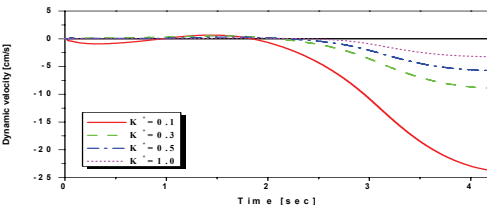
(c) Dynamic deflections at the center position



(d) Dynamic velocity at the center position

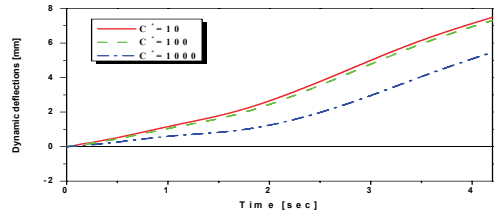


(e) Dynamic deflections at the end position

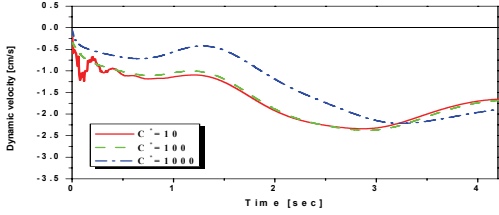


(f) Dynamic velocity at the end position

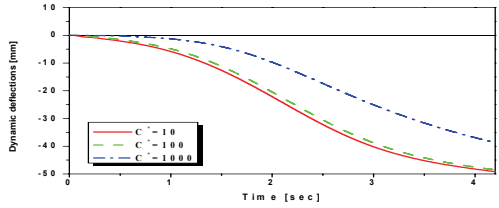
Fig. 3 Dynamic responses of a beam structure ($C^* = 100$, $K^* =$ different values)



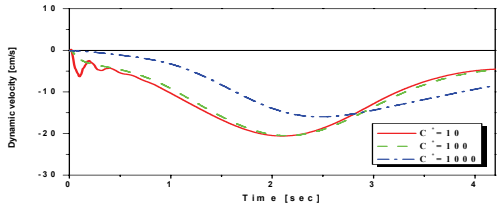
(a) Dynamic deflections at the start position



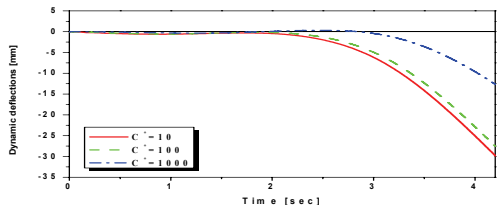
(b) Dynamic velocity at the start position



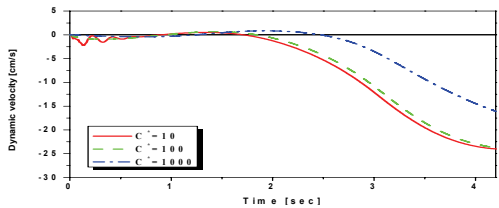
(c) Dynamic deflections at the center position



(d) Dynamic velocity at the center position



(e) Dynamic deflections at the end position



(f) Dynamic velocity at the end position

Fig. 4 Dynamic responses of a beam structure ($K^* = 0.1$, $C^* =$ different values)

나며 C^* 값이 0에서 1000으로 증가함에 따라 동적 처짐 및 속도가 다소 감소되는 경향을 보이고 있다. 또한, K^* 값을 변화시킬 때와 같이 동적 처짐은 끝단에서 최대가 되고, 선단에서 최소가 되는 경향을 보이며, 속도는 끝단에서 최대가 되고, 선단에서 최소가 되는 결과가 나왔다. 한편, Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에서 주행질량이 이동하는 초기시간에 선단에서 jumping 현상이 나타나는 이유는 보 구조물의 경계 조건이 자유-자유이므로 이동하기 시작하는 초기시간에 선단에서 급격히 속도가 증가하는 현상이 나타나는 것으로 사료된다.

4. 실험

4.1 실험장치

주행질량에 의해 하중을 받는 고무 스프링과 MR 댐퍼로 이산지지된 rail track 보 구조물의 동적거동에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위하여, Fig. 5와 같은 실험장치를 구성하였다. 또한, 이동질량의 동적거동 실험에 앞서, 모달테스트를 수행하였고, 고유진동수 및 모드형상을 도출하여 실험 보 구조물의 진동특성을 확인하였다.

Fig. 5에서 이동질량 ⑩은 외부전원선 및 컨트롤 박스 ⑪로 연결되어 보 구조물상에 있는 안내궤도를 따라 움직이도록 되어 있다. 모터의 부하를 줄이고 속도제어 시 이동질량과 보 구조물 사이에서 발생하는 마찰에 의한 외란의 영향을 줄이기 위해 이동질량은 4개의 롤러를 안내궤도에 지지하여 보 구조물에 결합시켰으며, 외부 전원선 및 자료 전송케이블이 이동질량의 주행에 방해가 되지 않도록 주행질량 상단부에 롤러를 이용한 케이블 이송 구조물을 설치하였다.

이동질량의 속도는 컴퓨터 ⑫상의 프로그램을 통해 Fig. 2에 나타난 수치를 컨트롤 박스 ⑪로 전송하여 제어할 수 있도록 하였다. 이동질량의 오작동 시 이동질량을 곧바로 멈출 수 있도록 긴급정지 단추를 별도로 구성하였고, 보 구조물 양 끝단에 완충기를 부착하여 이동질량의 궤도 이탈을 방지하였다.

보 구조물의 동적거동을 보다 정확하게 측정하기 위해서 5개의 가속도계를 Fig. 8에서 1, 3, 5, 7, 9 번 위치의 보 구조물 하부에 네오디뮴(neodymium) 자석으로 부착하고 펄스 분석기 ⑧에 연결하여 이

동질량의 주행에 의한 동적응답 신호를 컴퓨터 ⑨상의 PULSE 프로그램에서 실시간으로 확인하면서 측정결과를 저장할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 6은 실험에 사용한 부하전류에 따른 MR 댐퍼의 감쇠력을 나타내고 있고, Fig. 7은 고무스프링의 강성 그래프를 나타내고 있다. Fig. 8은 보 구조물의 치수와 가속도계의 위치를 나타내고 있으며, Fig. 9는 주행질량 및 보 구조물의 실험장치 사진을

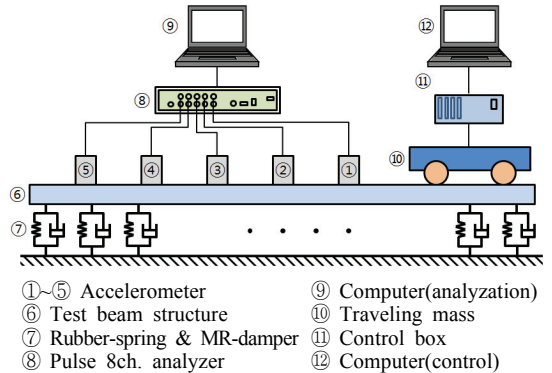


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup for a traveling mass test

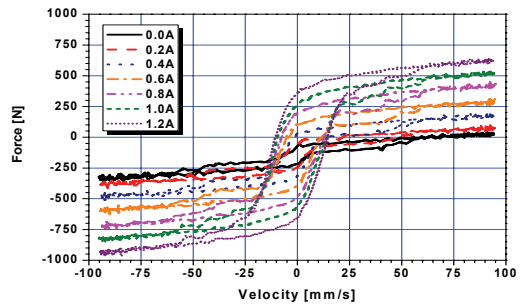


Fig. 6 Field-dependent damping forces of the MR damper(5 Hz excitation)

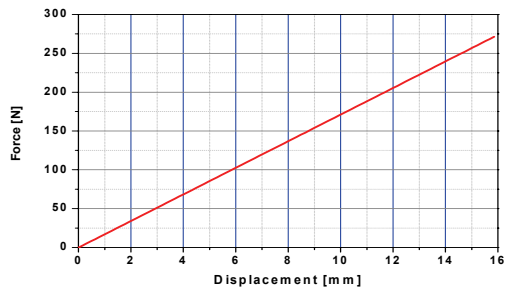


Fig. 7 Graph for stiffness of rubber spring

보여주고 있다. 또한, 실험 및 수치해석에 사용된 보 구조물의 치수 및 물리량은 Table 1과 같다.

4.2 실험 및 실험결과

(1) 방진 궤도레일의 진동특성

Fig. 10은 Fig. 8에 표기된 ①~⑨번 위치에서 측정된 각각의 주파수 응답 함수 중 선단(①), 중간점(⑤),

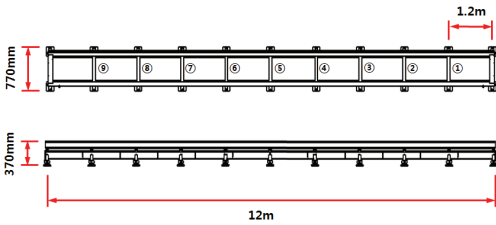


Fig. 8 Dimension and various sensor points of the test beam structure



Fig. 9 Experimental setup for traveling mass test

Table 1 Details of a test beam structure

Specifications	Values
Material	Steel-concrete
Young's modulus [N/m ²]	30 × 10 ⁹
Weight [kgf]	3,000

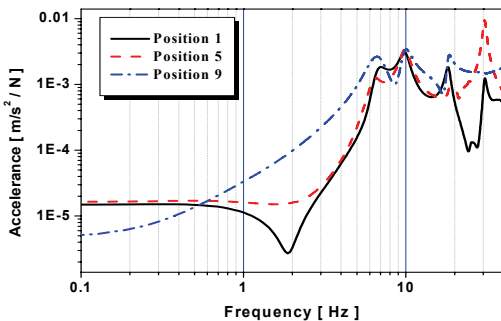


Fig. 10 Graph for FRF at ①, ⑤, ⑨ positions of a rail track

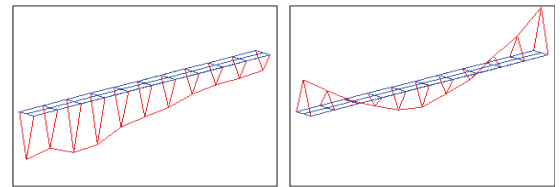
끝단(⑨)의 함수를 보의 동적응답에 영향을 주는 관심 있는 모드를 확인하기 위하여 0~40 Hz의 주파수 범위에서 그래프로 나타낸 것이며 각 위치에서 얻어진 고유진동수의 평균값을 Table 2에 정리하였다.

Fig. 10은 측정된 자료를 토대로 STAR system 프로그램을 통해 계산한 보 구조물의 모드형상을 나타낸 그림이다.

주행질량효과를 고려한 실험을 통하여 얻은 고유진동수와 수치시뮬레이션을 통해 얻은 고유진동수는 Table 3에 나타내었는데, Table 3에서 알 수 있듯이 수치시뮬레이션과 실험결과는 강제모드를 제외하면 약 2.7% 이내의 근사한 일치를 보이는 것으로 나타

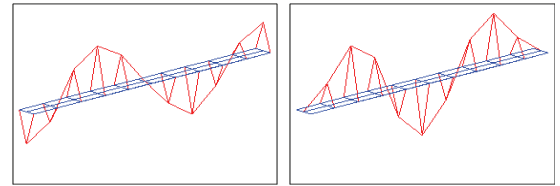
Table 2 Average of experimental natural frequencies at nine positions of a rail track

Mode	Rigid body [Hz]	Beam 1st [Hz]	Beam 2nd [Hz]	Beam 3rd [Hz]
Values	6.73	9.88	18.41	30.56



(a) Rigid body

(b) Slab 1st



(c) Slab 2nd

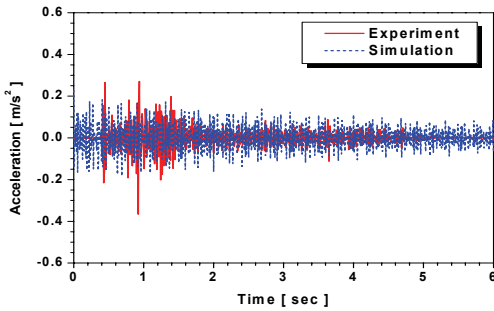
(d) Slab 3rd

Fig. 11 Experimental mode shapes for the first-four natural frequencies

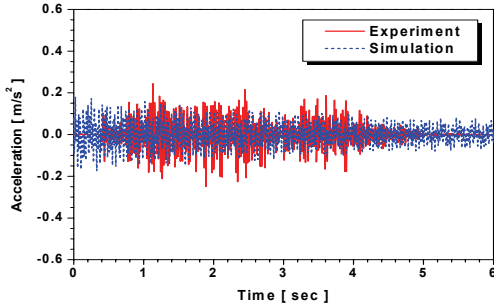
Table 3 Simulation natural frequencies with experimental ones for a beam structure

Mode	Rigid body [Hz]	Beam 1st [Hz]	Beam 2nd [Hz]	Beam 3rd [Hz]
Experiment	6.74	9.86	18.28	30.60
Simulation	4.66	9.61	18.17	29.79
Error(%)	30.86	2.54	0.60	2.65

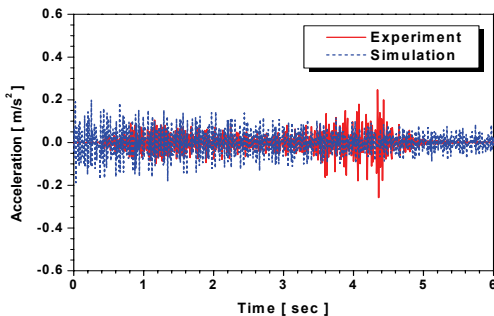
※ Error(%) = $\frac{(\text{Experiment value} - \text{Simulation value})}{(\text{Experimental value})} \times 100$



(a) Measuring position ①



(b) Measuring position ⑤



(c) Measuring position ⑨

Fig. 12 Graph for experimental and numerical dynamic responses

났다. 다른 수치보다 강체모드에서의 결과치가 다소 차이가 있는 것은 수치해석에 있어 보 구조물 자중에 의한 정적 처짐을 고려치 않았기 때문으로 사료된다.

(2) 주행질량하의 방진 궤도레일의 동적응답

Fig. 12는 Fig. 8에 표기된 ①, ③, ⑤, ⑦, ⑨번 위치에서 측정된 각각의 동적응답 신호 중, 선단(①), 중간점(⑤), 끝단(⑨)의 신호와 수치시뮬레이션을 통해 도출한 시간변화에 따른 응답결과를 나타낸 그래프이다.

5. 결 론

이 논문에서는 스프링-댐퍼로 이산지지된 보 구조물의 동적응답 및 진동특성에 대해 주행질량의 관성효과를 모두 고려하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 무차원 감쇠계수 값이 일정한 경우, 고정된 질량비에 대해 무차원 스프링 상수 값이 증가함에 따라 동적 처짐 및 속도가 현저히 감소되는 경향을 보였으며, 또한 동적응답은 중간점에서 최대가 되고, 선단에서 최소가 되는 것으로 보인다.

(2) 무차원 스프링상수 값이 일정한 경우, 고정된 질량비에 대해 값이 증가함에 따라 동적 처짐 및 속도가 다소 감소되는 경향을 보였으며, 또한 스프링상수 값을 변화시킬 때와 같이 동적응답은 끝단에서 최대가 되고, 선단에서 최소가 되는 경향을 보여주고 있다.

(3) 스프링-댐퍼 이산지지된 보 구조물의 최대 동적 처짐은 감쇠계수보다 스프링상수에 보다 더 많은 영향을 받는 것으로 보인다.

(4) 주행질량에 의한 보 구조물의 동적응답 및 진동특성 수치결과와 실험결과와의 비교는 근사한 값을 보여주고 있다.

후 기

이 논문은 중소기업청 지원 2009년도 산학공동기술개발지원사업 선도과제 수행 결과의 일부이며, 재정적 지원을 아끼지 않으신 관계기관에 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Inglis, C. E., 1934, A Mathematical Treatise on Vibration in Railway Bridges, Cambridge: Cambridge University Press.
 (2) Ayre, R. S., Ford, G. and Jacobsen, L. S., 1950, Transverse Vibration of a Two-span Beam under Action of a Moving Constant Force, Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 17, pp. 1~12.

(3) Stanisic, M. M. and Hardin, J. C., 1969, On the Response of Beams to an Arbitrary Number of Concentrated Moving Masses, *Journal of the Franklin Institute*, Vol. 287, No. 2, pp. 115~123.

(4) Yoshida, D. M. and Weaver, W., 1971, Finite Element Analysis of Beams and Plates with Moving Loads, *Publication of International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 179~195.

(5) Wilson, J. F., 1973, Response of a Curved Bridge to a Moving Load, *AIAA Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 4~5.

(6) Suzuki, S. I., 1977, Dynamic Behavior of a Finite Beam Subjected to Travelling Loads with Acceleration, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 55, No. 1, pp. 65~70.

(7) Sadiku, S. and Leipholz, H. H. E., 1987, On the Dynamics of Elastic Systems with Moving Concentrated Masses, *Ingenieur-archiv*, Vol. 57, pp. 223~242.

(8) Sieniawska, R. and Sniady, P., 1990, First Passage Problem of the Beam under a Random Stream of Moving Forces, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 136, No. 2, pp. 177~185.

(9) Humar, J. L., 1990, *Dynamics of Structures*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

(10) Olsson, M., 1991, On the Fundamental Moving Load Problem, *Journal of Sound and*

Vibration, Vol. 145, No. 2, pp. 299~307.

(11) Clough, R. W. and Penzien, J., 1993 *Dynamics of Structures*, New York: McGraw-Hill.

(12) Lee, U., 1998, Separation Between the Flexible Structure and the Moving Mass Sliding on It, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 197, No. 4, pp. 867~877.

(13) Kim, I. W., Lee, Y. S., Lee, G. S. and Ryu, B. J., 2001, Dynamic Response of Non-uniform Beam under a Travelling Mass, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 5, pp. 275~286.

(14) Dugush, Y. A. and Eisenberger, M., 2002, Vibrations of Non-Uniform Continuous Beams under Moving Loads, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 254, No. 5, pp. 911~926.

(15) Wu, J. J., 2005, Dynamic Analysis of an Inclined Beam due to Moving Loads, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 288, No. 1, pp. 107~131.

(16) Han, H. H., Lee, G. S., Jang, S. Y. and Park, M. H., 2009, Dynamic Analysis of Floating Slab Isolation System for Train, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 819~822.

(17) Ryu, B. J., Koo, H. W., Han, H. H., Lee, G. S., Lee, H. G. and Oh, B. J., 2010, Dynamic Characteristics Study of an Isolation Track with Discrete Supports, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 501~502.