

## 탄성스프링 지지를 갖고 이동질량을 받는 보의 동적응답

이종원<sup>†</sup>·류봉조\*·이규섭\*\*·송오섭\*\*\*·이영림\*\*\*\*

## Dynamic Response of a Beam with a Spring Support Subject to a Moving Mass

J. W. Lee, B. J. Ryu, G. S. Lee, O. S. Song, and Y. L. Lee

**Key Words:** Dynamic Response(동적응답), Runge-Kutta Integration Method (Runge-Kutta 적분 방법), Moving Mass(이동질량), Spring Support (스프링 지지),

## Abstract

This paper deals with the linear dynamic response of an elastically restrained beam under a moving mass, where the elastic support was modelled by translational springs of variable stiffness. Governing equations of motion taking into account of all inertia effects of the moving mass were derived by Galerkin's mode summation method, and Runge-Kutta integration method was applied to solve the differential equations. The effects of the speed, the magnitude of the moving mass, stiffness and the position of the support springs on the response of the beam have been studied. A variety of numerical results allows us to draw important conclusions for structural design purposes.

## 1. 서론

이동하중이나 이동질량에 의한 보 구조물의 동적 거동에 관한 문제는 철도차량에 의한 교량의 동적응답 문제나 이동하는 천정 크레인 등을 예로 들 수 있다. 이동물체에 의한 보 구조물의 동적응답 및 진동에 관한 연구의 시초는 영국의 체스터 철교의 붕괴사고 이후에서 비롯된다. Ayre 와 그의 공동연구자들<sup>(1)</sup>은 이동질량 하중의 작용하에 있는 단일 및 두 개 스펀 보에 대한 횡방향 진동에 대한 연구를 하였고, Ting과 그의 공동연구자들<sup>(2)</sup>은 이동질량 문제에 대해 그린함수를 이용한 일반 알고리즘을 제시하였다. Esmalilzadeh와 Ghorashi<sup>(3)</sup>는 이동질량의 관성효과를 고려한 보의

동적 응답을 고찰하였고, Lin<sup>(4)</sup>은 이동질량의 질량효과를 고려한 운동방정식을 제시하였다. 최근 김인우<sup>(5)</sup>는 이동질량을 받고 불균일 단면을 갖는 보의 동적응답을 실험을 통하여 검증하였다.

본 연구에서는 균일 속도의 이동질량을 받는 탄성지지된 보의 동적처짐을 이동질량의 속도 및 크기변화, 지지 스프링의 위치 및 상수변화에 따른 동적 응답을 수치해석적 방법을 이용하여 연구하는데 그 목적이 있다.

## 2. 이론해석

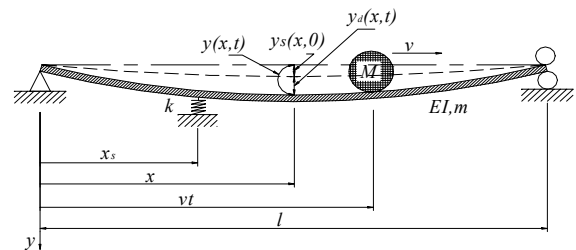


Fig. 1 A mathematical model of an elastically restrained beam under a moving mass.

<sup>†</sup> 충남대학교 대학원

E-mail : jw7921@hanmail.net

TEL : (042)821-1159 FAX : (042)821-1587

\* 한밭대학교 기계공학과

\*\* 대한 TDP(주)

\*\*\* 충남대학교 기계공학과

\*\*\*\* 공주대학교 기계공학과

이동질량에 의한 탄성 지지된 보에 대한 수학적 모델은 Fig. 1과 같고, 여기서, 보의 길이는  $l$ , 단위 길이 당 질량은  $m$ , 강성은  $EL$ , 이동질량의 크기는  $M$ , 이동 속도는  $v$ , 강성계수  $k$ 를 갖는 탄성 스프링 지지는 보의 임의의 위치  $x_s$ 에 있고, 지배방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = mg + Mg\delta(x-vt) - M \left[ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} v^2 + 2 \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x \partial t} v + \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} a + \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} \right] \delta(x-vt) \quad (1)$$

식 (1)의 해  $y(x,t)$ 는 초기 정적처짐  $y_s(x)$ 와 이동질량에 의한 동적변위  $y_d(x,t)$ 의 합으로 다음과 같이 가정된다.

$$y(x,t) = y_s(x) + y_d(x,t) \quad (2)$$

식 (1)에  $\xi = \frac{x}{l}$  관계를 이용하면 다음과 같다.

$$\frac{EI}{l^4} \frac{\partial^4 y(\xi,t)}{\partial \xi^4} + m \frac{\partial^2 y(\xi,t)}{\partial t^2} = mg + \frac{M}{l} \left[ g - \left\{ \bar{v}^2 \frac{\partial^2 y(\xi,t)}{\partial \xi^2} + 2 \bar{v} \frac{\partial^2 y(\xi,t)}{\partial \xi \partial t} + \bar{a} \frac{\partial y(\xi,t)}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 y(\xi,t)}{\partial t^2} \right\} \right] \delta(\xi - \bar{v}t) \quad (3)$$

여기서,  $\bar{v} = \frac{v}{l}$ ,  $\bar{a} = \frac{a}{l}$ 이다.

Galerkin의 모드 합 방법을 이용하여, 무차원화된 해를 각각 다음과 같이 가정하자.

$$y_s(\xi) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \phi_i(\xi) \quad (4)$$

$$y_d(\xi,t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \phi_i(\xi) \quad (5)$$

$$y(\xi,t) = \sum_{i=1}^{\infty} [A_i + a_i(t)] \phi_i(\xi) \quad (6)$$

여기서,  $\phi_i(\xi)$ 는 식 (7) 및 (8)의 형태를 갖는 계의 형상함수로서, 보의 형상 및 경계조건에 의해 결정된다.

본 논문과 같이 스프링의 위치  $x_s$ 에 탄성 스프링 지지된 경우 Fig. 2와 같은 좌표계를 사용하여, 식 (7) 및 (8)과 같이 표현할 수 있다.

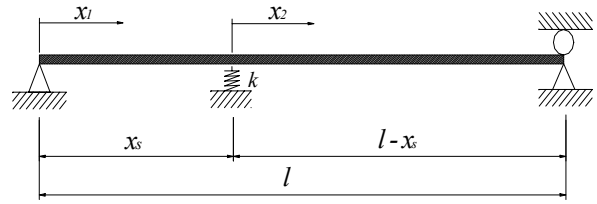


Fig. 2 A new coordinate system for a beam with a spring support.

$$\phi_{i,1}(\xi_1) = A_{i,1} \sin \beta_i \xi_1 + B_{i,1} \cos \beta_i \xi_1 + C_{i,1} \sinh \beta_i \xi_1 + D_{i,1} \cosh \beta_i \xi_1, \text{ for } (0 \leq \xi_1 \leq \xi_s) \quad (7)$$

$$\phi_{i,2}(\xi_2) = A_{i,2} \sin \beta_i \xi_2 + B_{i,2} \cos \beta_i \xi_2 + C_{i,2} \sinh \beta_i \xi_2 + D_{i,2} \cosh \beta_i \xi_2, \text{ for } (0 \leq \xi_2 \leq 1 - \xi_s) \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에서, 고유치  $\beta_i$ 는  $i$ 번째 고유진동수  $\omega_i$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\omega_i^2 = \frac{EI}{m} \left( \frac{\beta_i}{l} \right)^4 \quad (9)$$

본 논문의 경계조건은 양단단순지지 조건으로 식(10)부터 식 (12)에 나타난 바와 같다.

$$\phi_{i,1}(0) = 0, \frac{\partial^2 \phi_{i,1}(0)}{\partial \xi_1^2} = 0, \phi_{i,1}(\xi_s) = \phi_{i,2}(0), \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi_{i,1}(\xi_s)}{\partial \xi_1} = \frac{\partial \phi_{i,2}(0)}{\partial \xi_2}, \frac{\partial^3 \phi_{i,1}(\xi_s)}{\partial \xi_1^3} = \frac{k l^3}{EI} + \frac{\partial^3 \phi_{i,2}(0)}{\partial \xi_2^3} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_{i,1}(\xi_s)}{\partial \xi_1^2} = \frac{\partial^2 \phi_{i,2}(0)}{\partial \xi_2^2}, \phi_{i,2}(1 - \xi_s) = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \phi_{i,2}(1 - \xi_s)}{\partial \xi_2^2} = 0 \quad (12)$$

식 (7)과 식 (8)의 해를 식 (10)부터 (12)의 경계조건 식에 대입하면 식(13)의 고유치 문제의 식으로 귀결된다.

$$[S]\{c\} = \{0\} \quad (13)$$

여기서, 벡터  $\{c\}$ 는 다음과 같다.

$$\{c\}^T = \{ B_{i,1}, D_{i,1}, A_{i,2}, B_{i,2}, C_{i,2}, D_{i,2} \}$$

식 (6)의 해를 식 (3)의 운동 지배방정식에 대입하고 정적 처짐의 관계와 상수  $A_i$ 의 시간에 대한 미분 항을 제거하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{EI}{l^4} \sum_{i=1}^{\infty} \phi_{i,k}''''(\xi) q_i(t) + m \sum_{i=1}^{\infty} \phi_{i,k}(\xi) \ddot{q}_i(t) \\ &= \frac{M}{l} \left[ g - \left\{ \bar{v}^2 \sum_{i=1}^{\infty} \phi_{i,k}''(\xi) [A_i + q_i(t)] + 2\bar{v} \sum_{i=1}^{\infty} \phi_{i,k}'(\xi) \dot{q}_i(t) \right. \right. \\ & \left. \left. + \bar{a} \sum_{i=1}^{\infty} \phi_{i,k}'(\xi) [A_i + q_i(t)] + \sum_{i=1}^{\infty} \phi_{i,k}(\xi) \ddot{q}_i(t) \right\} \delta(\xi - \bar{v}t) \right] \quad (\text{for } k=1,2) \quad (14) \end{aligned}$$

식 (14)에  $\phi_{n,k}(\xi_k)$ 를 내적하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \int_0^1 \phi_{i,k}(\xi_k) \phi_{n,k}(\xi_k) d\xi_k + \frac{M}{m_k l} \phi_{i,k}(\bar{v}t) \phi_{n,k}(\bar{v}t) \right] \ddot{q}_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{M}{m_k l} 2\bar{v} \phi_{i,k}'(\bar{v}t) \phi_{n,k}(\bar{v}t) \right] \dot{q}_i(t) \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{EI}{m l^4} \beta_i^4 \int_0^1 \phi_{i,k}(\xi_k) \phi_{n,k}(\xi_k) d\xi_k \right. \\ & + \frac{M}{m l} \bar{v}^2 \phi_{i,k}''(\bar{v}t) \phi_{n,k}(\bar{v}t) \\ & + \frac{M}{m l} \bar{a} \phi_{i,k}'(\bar{v}t) \phi_{n,k}(\bar{v}t) \left. \right] q_i(t) \\ &= \frac{M}{m l} \left[ g - \bar{v}^2 \sum_{i=1}^{\infty} A_i \phi_{i,k}''(\bar{v}t) - \bar{a} \sum_{i=1}^{\infty} A_i \phi_{i,k}'(\bar{v}t) \right] \phi_{n,k}(\bar{v}t), \quad (\text{for } k=1,2) \quad (15) \end{aligned}$$

식 (15)를 다시 정리하면, 식 (16)의 행렬형태의 운동방정식을 얻게 된다.

$$[M(t)]\{\ddot{\varphi}(t)\} + [C(t)]\{\dot{\varphi}(t)\} + [K(t)]\{\varphi(t)\} = \{f(t)\} \quad (16)$$

여기서, 각 행렬들의 요소는 다음과 같다..

$$\begin{aligned} m_{ij}(t) &= \int_0^{\xi_s} \phi_{i,1}(\xi_1) \phi_{j,1}(\xi_1) d\xi_1 \\ & \quad + \int_0^{1-\xi_s} \phi_{i,2}(\xi_2) \phi_{j,2}(\xi_2) d\xi_2 + \mu \phi_{i,k}(\bar{v}t) \phi_{j,k}(\bar{v}t) \\ c_{ij}(t) &= 2\mu \bar{v} \phi_{i,k}'(\bar{v}t) \phi_{j,k}(\bar{v}t) \\ k_{ij}(t) &= \omega_i^2 \left\{ \int_0^{\xi_s} \phi_{i,1}(\xi_1) \phi_{j,1}(\xi_1) d\xi_1 \right. \\ & \quad \left. + \int_0^{1-\xi_s} \phi_{i,2}(\xi_2) \phi_{j,2}(\xi_2) d\xi_2 \right\} \\ & \quad + \mu \bar{v}^2 \phi_{i,k}(\bar{v}t) \phi_{j,k}''(\bar{v}t) + \mu_k \bar{a} \phi_{i,k}(\bar{v}t) \phi_{j,k}'(\bar{v}t) \\ f_i(t) &= \mu \left[ g - \bar{v}^2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \phi_{n,k}''(\bar{v}t) \right. \\ & \quad \left. - \bar{a} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \phi_{n,k}'(\bar{v}t) \right] \phi_{j,k}(\bar{v}t) \quad (17) \end{aligned}$$

식 (17)에서  $\mu = M/ml$ 은 이동질량과 보 질량의 질량 비를 나타내고,  $\xi_s$ 는 무차원화된 스프링 위치를 나타낸다.

### 3. 수치해석 결과 및 검토

수치해석에 있어, 주행물체의 질량변화는 보 질량에 대한 주행질량의 질량 비  $\mu$ 로, 주행질량의 속도변화는 임계속도  $v_{cr}$ 에 대한 주행질량의 속도비  $v_0 = v/v_{cr}$ 로 무차원화된 값을 이용하여 계산하였고, 본 논문의 모든 그래프들에서의 처짐 값은 동적처짐 값만을 나타낸다.

#### 3.1 스프링 지지가 없는 경우

Fig. 3부터 4는 질량비  $\mu$ 를  $\mu=0.1, 1.0$ 으로 고정시킨 상태에서 이동질량의 속도비  $v_0$ 의 변화에 따른 동적응답 그래프들이다. 먼저  $\mu$ 가 작은  $\mu=0.1$ 의 Fig. 3의 경우,  $v_0=0.1$ 을 제외하고는 속도비의 증가에 따라 최대 동적처짐을 유발하는 이동질량 위치는 이동질량의 우측단 쪽으로 이동해감을 알 수 있다. 질량비가 큰  $\mu=1.0$ 의 경우도 최대 동적처짐을 유발하는 이동질량의 위치는 속도비의 증가에 따라 우측 단으로 이동된다. 또한, 질량비  $\mu$ 값의 크기에 관계없이 속도 비  $v_0$ 가  $v_0=0.5$ 부근에서 최대 동적 처짐을 나타낸다는 것이다.

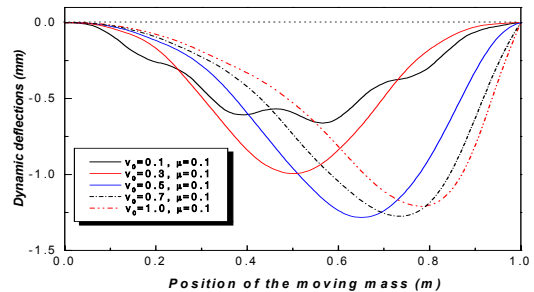


Fig. 3 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=0.1$ )

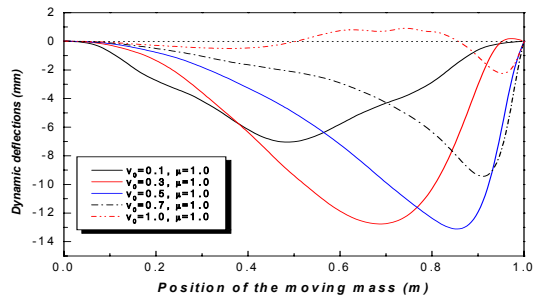


Fig. 4 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0$ )

Fig. 5에서 6은 이동질량의 속도 비  $v_0$ 가  $v_0=0.1$ ,  $v_0=1.0$  인 각각에 대해  $\mu$ 의 변화에 따른 동적 처짐 값을 나타낸다. 속도비가 작은  $v_0=0.1$ 의 경우,  $\mu=0.1$ 을 제외하고는 질량비의 증가에 따라 최대 동적 처짐을 유발하는 이동질량의 위치는 보의 우측 단으로 이동해간다. 또한,  $v_0=0.1$ 에서는 질량비가 증가함에 따라 동적 처짐 값은 증가된다. 속도비가 큰 임계속도  $v_0=1.0$ 에서는  $\mu=0.5$ 까지는 질량비 증가에 따라 최대 동적 처짐이 증가되지만  $\mu>0.5$ 에서는 질량비 증가에 따라 최대 동적 처짐 값은 감소됨을 알 수 있다.

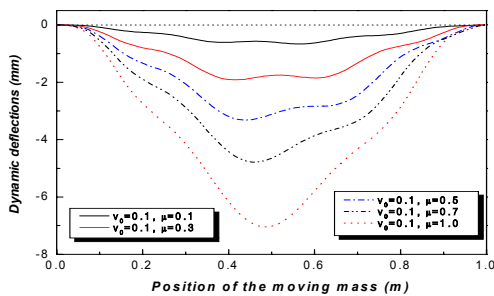


Fig. 5 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $v_0=0.1$ )

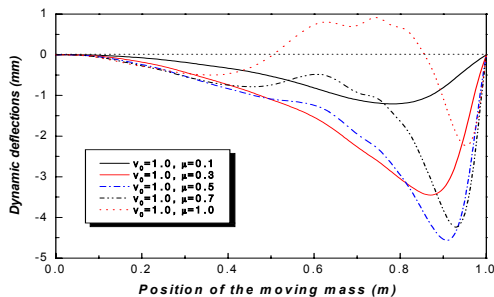


Fig. 6 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $v_0=1.0$ )

3.2 스프링 지지된 경우 보의 동적응답

Fig. 7부터 9는 질량비  $\mu$ 와 속도 비  $v_0$ 가 작은  $\mu=0.1$ ,  $v_0=0.1$ 의 경우, 지지 스프링의 위치 변화와 스프링 강성의 변화에 따른 동적 처짐 값을 나타낸 그림들이다. 이 그림들에서 알 수 있는 것은 스프링 강성이 증가됨에 따라, 지지 스프링의 위치에 관계없이 최대 동적 처짐 값이 감소되는 것이다. 한편, 무차원 스프링 위치  $\xi_s$ 가  $\xi_s=0.2$ 인 Fig. 9에서는 스프링 강성이 증가함에 따라 최대 동적 처짐을 유발하는 이동질량의 위치는 보의 우측 단으로 이동된다. 그러나  $\xi_s=0.5$ 에서는

강성증가에 따라  $K \leq 10^2$ 까지는 최대 동적 처짐을 일으키는 이동질량 위치도 경미하게 우측으로 이동되지만,  $K \geq 10^4$ 에서는 좌측으로 이동된다.  $\xi_s=0.8$ 에서도 강성증가에 따라 최대처짐을 유발하는 이동질량 위치는 보의 좌측단으로 이동된다.

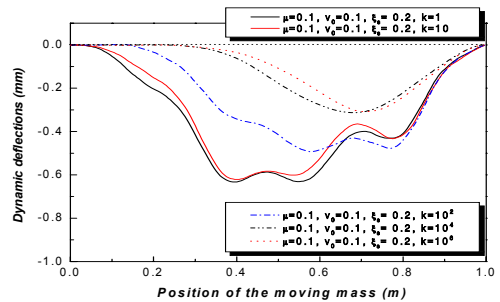


Fig. 7 Dynamic deflections at the position of the moving mass( $\mu=0.1$ ,  $v_0=0.1$ ,  $\xi_s=0.2$ )

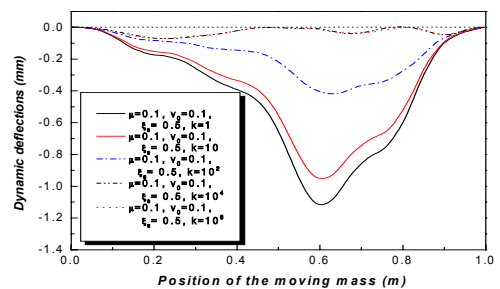


Fig. 8 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=0.1$ ,  $v_0=0.1$ ,  $\xi_s=0.5$ )

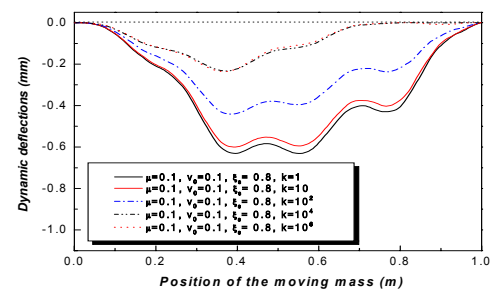


Fig. 9 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=0.1$ ,  $v_0=0.1$ ,  $\xi_s=0.8$ )

Fig. 10부터 12는 질량비  $\mu$ 가  $\mu=0.1$ , 속도비가  $v_0=0.5$ 인 경우로서 질량비는 작으나 속도비가 Fig. 7~9에 비해 5배 증가되었을 때, 스프링 위치와 강성변화에 따라 동적 처짐 값을 나타낸 그림들이다. 이들 그림에서 알 수 있는 것은 이동

질량의 속도가 커지면 스프링 강성이 작다고 반드시 동적 처짐 값이 크지만은 않은 것이고, 스프링 위치가 동적 처짐 값에 큰 영향을 있음을 알 수 있다. 또한,  $\zeta_s=0.2, 0.5$ 의 Fig. 10~Fig. 11에서는 스프링 강성이 증가함에 따라 최대 동적 처짐을 유발하는 이동질량의 위치는 우측 단으로 이동되고, Fig. 12의  $\zeta_s=0.8$ 에서는 강성증가에 따라 보의 좌측 단으로 이동된다.

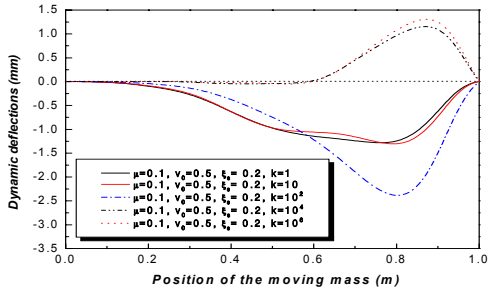


Fig. 10 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=0.1, v_0=0.5, \zeta_s=0.2$ )

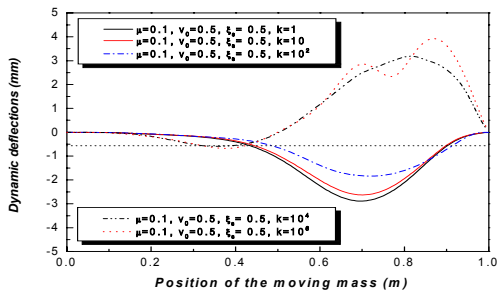


Fig. 11 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=0.1, v_0=0.5, \zeta_s=0.5$ )

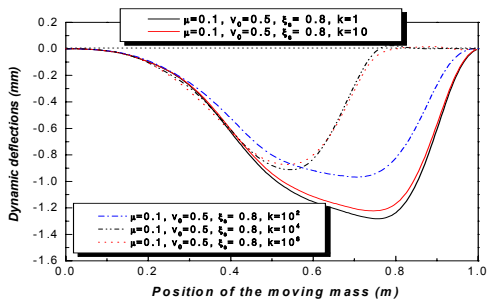


Fig. 12 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=0.1, v_0=0.5, \zeta_s=0.8$ )

Fig. 13~15는  $\mu=1.0, v_0=0.1$ 로써 이동질량 속도는 작지만 질량비가 큰 경우의 처짐 값으로,

이 그림에서 알 수 있는 것은 Fig. 7~9의 경우처럼 대부분 강성이 증가함에 따라 최대 동적 처짐 값은 스프링 위치에 관계없이 감소되는 것이다.

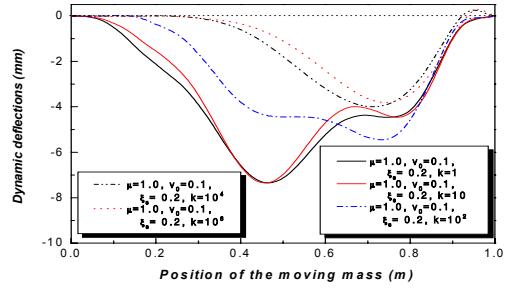


Fig. 13 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0, v_0=0.1, \zeta_s=0.2$ )

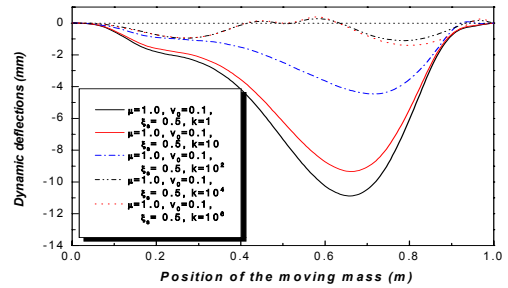


Fig. 14 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0, v_0=0.1, \zeta_s=0.5$ )

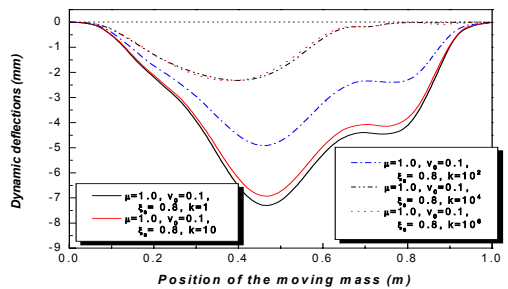


Fig. 15 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0, v_0=0.1, \zeta_s=0.8$ )

Fig. 16~18은  $\mu=1.0, v_0=0.5$ 로써 질량비와 속도비가 큰 경우, 스프링상수와 위치 변화에 따른 동적응답을 나타낸 것이다. Fig. 10~12에서와 같이 속도비가 크면 강성 증가에 따라 반드시 최대 동적 처짐 값이 작아지는 않는다. 또한 고정된 스프링 위치 값들에서  $K \leq 10^2$ 까지는 강성증가에 따라 최대 동적 처짐을 유발하는 이동질량의 위치는 보의 우측 단으로 이동된다.

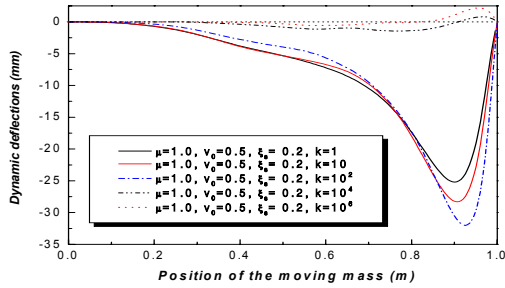


Fig. 16 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0, v_0=0.5, \xi_s=0.2$ )

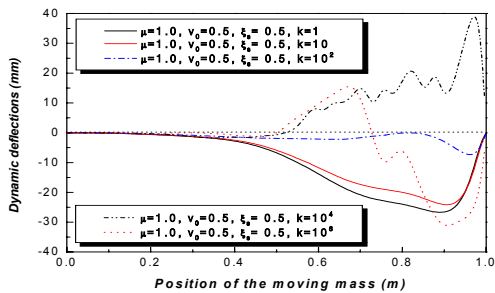


Fig. 17 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0, v_0=0.5, \xi_s=0.5$ )

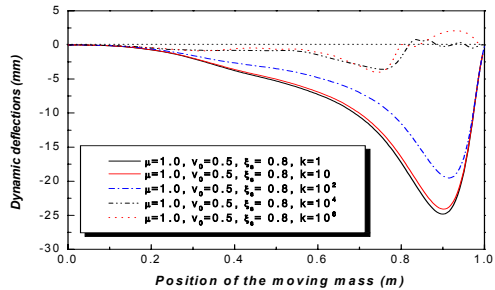


Fig. 18 Dynamic deflections at the position of the moving mass ( $\mu=1.0, v_0=0.5, \xi_s=0.8$ )

#### 4. 결론

탄성 스프링에 지지되고, 일정 속도의 이동 질량에 의한 양단 단순지지 보의 동적 응답에 관한 이론 및 수치해석 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

##### 4.1 스프링 지지가 없는 경우

속도비와 질량비  $\mu$ 가 작은, 즉  $v_0=0.1$ ,  $\mu=0.1$ 의 경우로 정의하면은 고정된 질량비  $\mu$ 값에서 이동질량의 속도비  $v_0$ 가 증가함에 따라 최대 동

적 처짐을 유발하는 이동질량의 위치는 이동질량의 출구 단 쪽으로 이동된다. 또한 고정된 속도비  $v_0$ 에 대해 질량비  $\mu$ 가 증가함에 따라 최대 동적 처짐을 유발하는 이동질량 위치는 이동질량의 출구 단 쪽으로 이동된다.

##### 4.2 스프링 지지된 경우 보의 동적응답

속도비  $v_0$ 가  $v_0=0.1$ 의 작은 경우에는 질량비  $\mu$ 에 관계없이 스프링 강성 증가에 따라 최대 동적 처짐 값은 작아지지만, 속도비가 비교적 큰  $v_0=0.5$ 에서는 스프링 강성 감소가 반드시 최대 동적 처짐 값을 나타내지는 않는다.

질량비  $\mu$ 가 큰 경우( $\mu=1.0$ )는 이동질량 속도비  $v_0$  변화에 관계없이, 스프링 강성  $K \leq 10^2$ 에 대해  $K$ 값이 증가함에 따라 최대 동적 처짐을 유발하는 이동질량 위치는 보의 우측 단으로 이동된다.

질량비  $\mu$ 가 작은 경우( $\mu=0.1$ )는  $K \leq 10^2$ ,  $\xi_s < 0.8$ 에 대해 최대 동적 처짐을 유발하여 이동질량의 위치는 강성  $K$ 의 증가와 함께 보의 우측 단으로 이동되지만,  $\xi_s \geq 0.8$ 에서는 강성  $K$ 의 증가에 따라 보의 좌측 단으로 이동된다.

#### 참고문헌

- (1) Ayre, R. S., Jacobsen, L. S. and Hsu, C. S., 1951, "Transverse Vibration of One and Two-Span Beams under the Action of a Moving Mass Load," Proceedings of the First U.S. National Congress of Applied Mechanics, pp.81 ~ 90.
- (2) Ting, E. C., Genin, J. and Ginsberg, J. H., 1974, "A General Algorithm for Moving Mass Problems," Journal of Sound and Vibration, Vol. 33, pp.49~58.
- (3) Esmailzadeh, E. and Ghorashi, M., 1992, "Vibration Analysis of Beams Traversed by Moving Masses," Proceedings of the International Conference on Engineering Application of Mechanics, Tehran, Iran, Vol. 2, pp.232~238.
- (4) Lin, Y. H., 1997, "Comments on Vibration Analysis of Beams Traversed by Uniform Partially Distributed Moving Masses," Journal of Sound and Vibration, Vol. 199, No. 4, pp.697~700.
- (5) 김인우, 1999, "이동질량에 의한 균일 및 불균일 단면 보의 동적 거동에 관한 연구," 충남대학교 박사학위 논문.