

# 이동질량과 크랙을 가진 단순지지 보의 동특성에 관한 연구

윤한익\* · 손인수\*\* · 조정래\*\*

\*동의대학교 기계정보산업공학부, \*\*동의대학교 대학원 기계공학과

## A Study on the Dynamic Behavior of a Simply Supported Beam with Moving Masses and Cracks

HAN-IK YOON\*, IN-SOO SON\*\*, AND JEONG-RAE CHO\*\*

\*Faculty of Mechanical and Industrial system Engineering, Dong-eui University, Busan, Korea

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate school of Dong-eui University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Open Crack 개구형 크랙, Dynamic Behavior 동적특성, Moving Mass 이동질량, Strain Energy Density Function 변형률 에너지 밀도함수, Flexibility Matrix 유연행렬

**ABSTRACT:** To determine the effect of transverse open crack on the dynamic behavior of simply-supported Euler-Bernoulli beam with the moving masses, an iterative modal analysis approach is developed. The influence of depth and position of the crack in the beam, on the dynamic behavior of the simply supported beam system, have been studied by numerical method. The cracked section is represented by a local flexibility matrix, connecting two undamaged beam segments that is, the crack is modeled as a rotational spring. This flexibility matrix defines the relationship between the displacements and forces across the crack section, and is derived by applying a fundamental fracture mechanics theory. As the depth of the crack is increased, the mid-span deflection of the simply-supported beam, with the moving mass, is increased. The crack is positioned in the middle point of the pipe, and the mid-span deflection of the simply-supported pipe represents maximum deflection.

### 1. 서 론

이동질량을 가진 보 형태의 구조물은 항만 등에서 컨테이너를 선적, 혹은 하역하는 컨테이너 크레인과 호이스트 크레인, 교량, 그리고 이송용 컨베이어 등 일상에서 흔히 접할 수 있는 시스템이다. 여기서 이동질량은 크레인 장비의 트롤리(trolley)를 예로 들 수 있다. 이러한 구조물에 안정성 및 동특성을 변화시키는 크랙 형태의 결함이 존재한다면 구조물의 불안정 및 파괴와 같은 안전사고의 문제로 연결된다. 따라서 크랙의 존재를 미리 감지하고 위험을 예방하기 위하여 구조물의 동특성 변화를 측정하여 결함의 크기 및 위치를 탐지하는 것은 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 특히, 이러한 방법은 구조물에 손상을 주지 않고 결함을 탐지해 낼 수 있는 비파괴적인 방법중의 하나이기 때문에 구조물의 안전진단에 매우 유용한 방법이라 할 수 있다. 일반적으로 크랙은 구조물의 강성을 저하시키고 모드형상의 변화를 유발한다(Nikpour, 1990). 크랙이 구조물의 동특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 초기에는 구조물에서 단지 크랙이 존재하는 부분의 강성을 줄이는 방법(Datta and Lal., 1992)에서 시작하여, 최근에는 유연행렬을 이용하는 해석 방법이 주로 사용되어 지고 있다(Ruotolo et al., 1996; Ghondros

et al., 1998). Chondros (1977)는 크랙을 가진 오일러-베르누이 보의 고유진동수와 진동모드 변화를 이론과 실험을 통하여 제시하였다. Dimarogonas(1996)는 회전축에 존재하는 크랙부분의 유연행렬을 계산하여 회전축의 진동특성을 연구하였으며, 크랙을 가지는 보 형태의 구조물에 대해 연구된 많은 연구자들의 연구결과들을 총괄적으로 정리하여 발표하였고, Mahmoud Abou Zaid.(2002)는 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 집중 질량을 가진 크랙 단순지지 보의 동적응답을 전달행렬법으로 해석하였다. 또, 최근 컨테이너 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구(손유식과 김영복, 2000)와 이동질량의 영향을 받는 유체유동 파이프의 진동특성에 대한 많은 연구 결과가 발표되어지고 있다(윤한익, 2001; 윤한익 등., 2002).

이 연구에서는 항만 등에서 사용하는 컨테이너 크레인 및 산업현장 등에서 생산된 제품이 다음 공정으로 이동할 때 이용되는 컨베이어형 구조물을 고려한 것이다. 즉, 하나의 이동질량 또는 연속 이동질량들을 가지는 단순지지 보에 진동이 없는 개구형 크랙이 존재할 때 크랙의 크기와 크랙이 존재하는 위치가 단순지지 보의 횡방향 진동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 단순지지 보의 해석은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였으며, 단순지지 보에서 크랙이 존재하는 위치에서 크랙의 영향에 의한 파괴역학적 변수를 구하여 보의 횡방향 진동에 영향을 미치는 등가의 회전 스프링 상수로 변환하여 수치해석에 이용하였다.

제1저자 윤한익 연락처: 부산광역시 부산진구 가야3동 산 24.

051-890-1645 hiyoon@dongeui.ac.kr

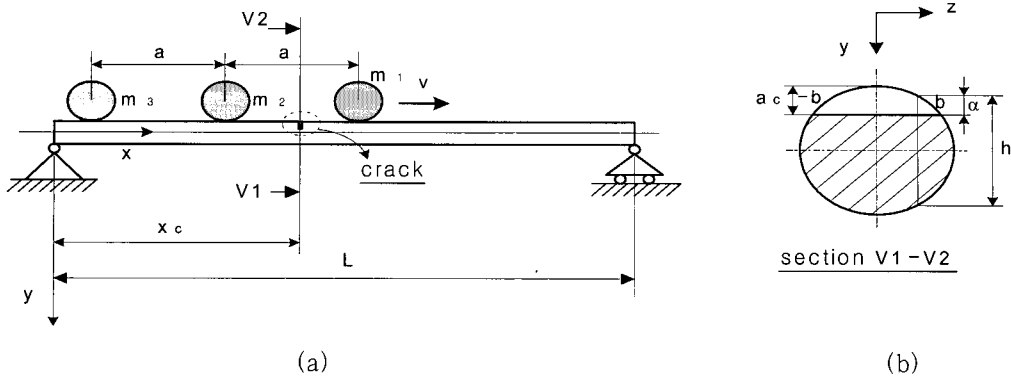


Fig. 1 Geometry of the cracked simply supported beam with the moving masses  
 (a) 탄성계의 개략도, (b) 크랙부분의 보단면

2. 시스템 모델링

Fig. 1 (a)는 크랙을 가진 단순지지 보 위를 이동질량들이 일정한 속도로 이동하는 탄성계의 개략도를 나타내고 있다. 여기서  $m_k$ 은 보 위를 이동하는 이동질량,  $v$ 는 이동질량의 속도, 그리고  $L$ 은 단순지지 보의 전체 길이를 나타낸다. Fig. 1 (b)는 크랙 부분의 보 단면을 나타낸 것이며, 여기서  $a$ 는 크랙의 깊이를 의미하며  $a_c$ ,  $h'$ , 그리고  $b$ 는 각각 크랙의 최대 깊이와 크랙이 존재하는 보 단면 지름, 그리고 크랙의 길이를 표현하고 있다. 또,  $x_c$ 는 크랙이 존재하는 위치를 나타낸다. 연속 보 형태의 구조물에서 크랙에 의한 부분적인 강성저하는 불연속 구간을 초래하게되므로 크랙위치에서 별도의 연속조건을 설정해야한다.

2.1 단순지지 보 및 이동질량들의 에너지

단순지지 보의 횡변위  $y(x, t)$ 는 이동질량이 없는 경우, 경계조건을 만족시키는 단순지지 보의 고유함수  $\phi_i(x)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\mu} \phi_i(x) q_i(t) \tag{1}$$

여기서,  $q_i(t)$ 는 일반화 좌표,  $\mu$ 는 모드의 수를 나타낸다. 또,  $\phi_i(x)$ 는 단순지지 보의 횡방향 진동의 모드모양을 표현하고 있다. 단순지지 보의 고유함수를 이용하여 크랙을 가진 단순지지 보의 포텐셜 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$V_p = \frac{1}{2} EI \sum_{i=1}^{\mu} \left[ \int_0^{x_c} \left\{ \frac{d^2 \phi_{i1}(x) q_i(t)}{dx^2} \right\}^2 dx + \int_{x_c}^L \left\{ \frac{d^2 \phi_{i2}(x) q_i(t)}{dx^2} \right\}^2 dx \right] + \frac{1}{2} K_R (\Delta y'_c)^2 \tag{2}$$

여기서  $K_R$ 은 크랙으로 인하여 부가되는 회전 스프링상수를 의미하며,  $E$ 는 영 계수를 나타낸다. 또,  $\Delta y'_c$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta y'_c = \frac{dy(x_2=0)}{dx} - \frac{dy(x_1=x_c)}{dx} \tag{3}$$

여기서  $x_1$ 과  $x_2$ 는 각각 크랙으로 인한 불연속구간의 첫 번째 구간의 끝점과 두 번째 구간의 시작점을 표현하고 있다. 단순지지 보의 운동에너지를 구하면 다음과 같다

$$T_p = \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^{\mu} \left[ \int_0^{x_c} \{ \phi_{i1}(x) \dot{q}_i(t) \}^2 dx + \int_{x_c}^L \{ \phi_{i2}(x) \dot{q}_i(t) \}^2 dx \right] \tag{4}$$

여기서  $m$ 은 단순지지 보의 단위길이당 질량이다. 이동질량들은 단순지지 보와 분리되지 않고 접촉된 상태로 이동한다고 가정하였으며, 따라서 이동질량들의 연직방향 변위는 단순지지 보의 변위와 동일하다. 이동질량들의 변위와 속도를 이용하여 이동질량들의 운동에너지를 구하면 다음과 같다.

$$T_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^2 \left[ m_k \sum_{i=1}^{\mu} \left[ \left\{ v q_i(t) \frac{\phi_{ij}(x_k)}{dx} \right\}^2 + 2 v q_i(t) \dot{q}_i(t) \phi_{ij}(x_k) \left\{ \frac{\phi_{ij}(x_k)}{dx} \right\} + \dot{q}_i^2(t) \phi_{ij}^2(x_k) \right] + m_k v^2 \right] \tag{5}$$

$$\text{where, } j = \begin{cases} 1 & (0 \leq x_k \leq x_c), \\ 2 & (x_c < x_k \leq L) \end{cases}$$

여기서  $k$ 는 이동질량의 수이고, 이 연구에서는 이동질량을 3개로 하였다. 이동질량의 수평 변위  $x_k$ 는 다음과 같다.

$$x_k = f(t) = \begin{cases} \int_0^t v dt - a(k-1) & (0 \leq x_k \leq L), \\ 0 & (x_k > L) \end{cases} \tag{6}$$

2.2 크랙에 의한 탄성변형 에너지

같은 하중이 작용하는 구조물에서도 크랙이 존재하는 경우, 구조물의 자체 탄성 변형에너지 외에 크랙에 의한 변형에너지가 존재하고 이 부가 에너지만큼 추가적인 변형이 더 발생하게 된다. 선형 탄성구간에서 Castigliano의 정리에 의하여 크랙

에 의해서 부가되는 추가적인 변위와 크랙 부분의 유연행렬은 각각 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$u_i = \frac{\partial}{\partial P_i} \int_0^c J(a) da \quad (7)$$

$$C_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \left[ \int_{-b}^b \int_0^c J(a) da dz \right] \quad (8)$$

여기서  $P_i$  는  $i$  방향으로의 일반화 힘으로  $i = 1, 2, \dots, 6$  이고,  $J(a)$  는 변형률 에너지 밀도함수(strain energy density function)로서 이 연구에서는 굽힘 하중에 대한 부분만을 고려하였으며, 다음과 같이 표현할 수 있다(Kim and Kim, 2000).

$$J(a) = \frac{1}{E^*} (K_{IM} + K_{IP})^2 \quad (9)$$

여기서  $E^*$  은 평면변형에 대하여  $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$  로 표현되며,  $\nu$  는 프와송 비를 나타낸다.  $K_{IP}$  는 전단력에 의한 응력집중 계수,  $K_{IM}$  은 모멘트에 의한 응력집중 계수를 나타낸다.

실축 원형단면인 경우 식 (9)의 응력집중 계수는 각각 다음과 같다(Kim and Kim, 2000).

$$K_{IP} = \frac{2V}{\pi R^4} L \sqrt{R^2 - z^2} \sqrt{\pi a} F_I(a/h) \quad (10)$$

$$K_{IM} = \frac{4M}{\pi R^4} \sqrt{R^2 - z^2} \sqrt{\pi a} F_I(a/h)$$

여기서  $z$  는 Fig. 1 (b)의 가로축을 의미하며,  $F_I(a/h)$  는 다음과 같다.

$$F_I(a/h) = \sqrt{\frac{1}{\zeta} \tan(\zeta)} \frac{[0.923 + 0.199(1 - \sin \zeta)^4]}{\cos \zeta} \quad (11)$$

여기서  $\zeta = \frac{\pi a}{2h}$  이다. 따라서, 식 (9) ~ 식 (11)을 식 (8)에 대입하면 유연행렬 (6×6)을 얻을 수 있으며, 해석에 필요한 회전 스프링 상수는 이 유연행렬의 역수를 취함으로써 구할 수 있다.

또, 크랙위치를 기준으로 고유함수  $\phi_i(x)$  는 다음과 같이  $x$  의 추가적인 다항식 함수(plus a polynomial function)로 표현할 수 있다.

$$\phi_{ij}(x) = \begin{cases} \phi_{i1}(x) = \phi_i(x) + B_0 + B_1x + B_2x^2 \\ \quad + B_3x^3, & 0 \leq x \leq x_c, \\ \phi_{i2}(x) = \phi_i(x) + C_0 + C_1x + C_2x^2 \\ \quad + C_3x^3, & x_c \leq x \leq L \end{cases} \quad (12)$$

식 (12)에서 상수  $B_s$  와  $C_s$  ( $s = 0, 1, \dots, 3$ )는 크랙위치에서 4개의 경계조건과 단순지지 보의 경계조건을 대입하여 구할 수 있다. 크랙위치( $x = x_c$ )에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_{i1}(x) &= \phi_{i2}(x), & \frac{d^2 \phi_{i1}(x)}{dx^2} &= \frac{d^2 \phi_{i2}(x)}{dx^2}, \\ \frac{d^3 \phi_{i1}(x)}{dx^3} &= \frac{d^3 \phi_{i2}(x)}{dx^3}, \\ \frac{d \phi_{i2}(x)}{dx} - \frac{d \phi_{i1}(x)}{dx} &= \frac{EI}{K_R} \frac{d^2 \phi_{i2}(x)}{dx^2} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의 경계조건과 단순지지 보의 경계조건을 대입하여 식 (12)의 미지수를 구하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_{i1} &= \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) - \left(1 - \frac{L}{x_c}\right) \left\{ \frac{x_c}{L} \frac{EI}{K_R} \left(\frac{i\pi}{L}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. \times \sin\left(\frac{i\pi x_c}{L}\right) \right\} x, & 0 \leq x \leq x_c, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \phi_{i2} &= \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right) + \left(1 - \frac{x}{L}\right) x_c \frac{EI}{K_R} \left(\frac{i\pi}{L}\right)^2 \\ &\quad \times \sin\left(\frac{i\pi x_c}{L}\right), & x_c \leq x \leq L \end{aligned} \quad (15)$$

### 2.3 계의 운동방정식

계의 운동방정식은 식 (2) ~ 식 (6)의 에너지 식을 Lagrange 방정식에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \left[ \left\{ m \int_0^{x_c} \phi_{i1}^2(x) dx + m \int_{x_c}^L \phi_{i2}^2(x) dx \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{k=1}^3 m_k \phi_{ij}^2(x_k) \right\} \ddot{q}_i(t) + \sum_{k=1}^3 m_k \frac{d}{dt} \left\{ \phi_{ij}^2(x_k) \right\} \dot{q}_i(t) \right] \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \left[ EI \int_0^{x_c} \left\{ \frac{d^2 \phi_{i1}(x)}{dx^2} \right\}^2 dx + EI \int_{x_c}^L \left\{ \frac{d^2 \phi_{i2}(x)}{dx^2} \right\}^2 dx \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^3 \left[ v m_k \frac{d^2 \{ \phi_{ij}(x_k) \}}{dt dx} \phi_i(x_k) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - m_k v^2 \left\{ \frac{d \phi_i(x_k)}{dx} \right\}^2 + v m_k \frac{d}{dt} \{ \phi_i(x_k) \} \frac{d \phi_i(x_k)}{dx} \right] \right. \\ &\quad \left. + K_R \left\{ \frac{d \phi_{i2}(x_2=0)}{dx} - \frac{d \phi_{i1}(x_1=x_c)}{dx} \right\}^2 \right] q_i(t) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)의 운동방정식을 무차원화하기 위하여 무차원 매개변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L}, & \xi_j &= \frac{x_j}{L} \quad (j=1,2), & \xi_c &= \frac{x_c}{L}, \\ d &= \frac{q}{L}, & \beta_k &= \frac{m_k L}{\sqrt{mEI}} \bar{v}, & \tau &= \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \\ \gamma_k &= \frac{m_k L^3}{EI} \bar{v}^2, & M_k &= \frac{m_k}{mL}, & K_R^* &= \frac{K_R L}{EI}, \\ A &= \frac{a}{L}, & \bar{x}_k &= \bar{v} L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau - A(k-1) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $\bar{v}$  는  $v/L$  이다.

식 (17)의 무차원 매개변수를 이용하여 계의 무차원화된 운동방정식을 행렬형태로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{0} \quad (18)$$

여기서  $(\cdot)$ 는 무차원화된 시간  $\tau$ 에 대한 미분을 나타내며, 식 (18)의 각 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^{\mu} \left\{ \int_0^{\xi_c} \phi_{i1}^2(\xi) d\xi + \int_{\xi_c}^1 \phi_{i2}^2(\xi) d\xi + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^2 M_k \phi_{ij}^2(\bar{x}_k) \right\} \quad (19)$$

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^{\mu} \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^2 \left\{ M_k \frac{d}{d\tau} [\phi_{ij}^2(\bar{x}_k)] \right\} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = & \sum_{i=1}^{\mu} \left[ \int_0^{\xi_c} \left\{ \frac{d^2 \phi_{i1}(\xi)}{d\xi^2} \right\}^2 d\xi + \int_{\xi_c}^1 \left\{ \frac{d^2 \phi_{i2}(\xi)}{d\xi^2} \right\}^2 d\xi \right. \\ & + \sum_{k=1}^3 \left[ \beta_k \frac{d^2 \{\phi_{ij}(\bar{x}_k)\}}{d\tau d\xi} \phi_{ij}(\bar{x}_k) - \gamma_k \left\{ \frac{d\phi_{ij}(\bar{x}_k)}{d\xi} \right\}^2 \right. \\ & + \beta_k \frac{d}{d\tau} \{\phi_{ij}(\bar{x}_k)\} \frac{d}{d\xi} \{\phi_{ij}(\bar{x}_k)\} \\ & \left. \left. + K_R \left\{ \frac{d\phi_{2i}(\xi_2=0)}{d\xi} - \frac{d\phi_{1i}(\xi_1=\xi_c)}{d\xi} \right\}^2 \right] \right] \quad (21) \end{aligned}$$

여기서  $(\cdot)$ 는 무차원 축방향 좌표인  $\xi$ 에 대한 미분을 표현한 것이다.

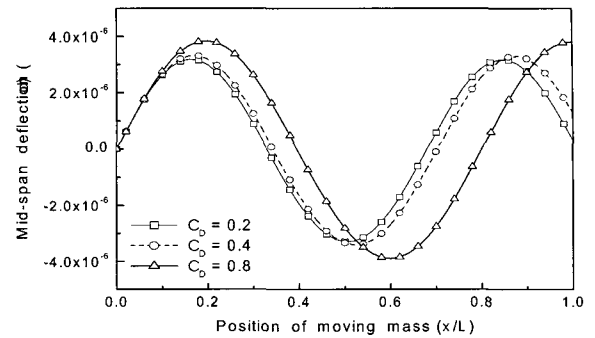
### 3. 수치해석 결과 및 고찰

이 연구에서는 이론해석에서 유도된 무차원 운동방정식을 이용하여 크랙의 크기와 위치 및 이동질량이 단순지지 보의 횡방향 진동에 미치는 영향을 수치해석을 통해 비교, 고찰하였다. 수치해석은 Matlab(6.1)에서 4차의 Runge-Kutta 방법으로 수행하였으며, 수치해석에 있어서 제 1차 모드의 횡변위가 제 2차 또는 그 이상의 상위 모드의 횡변위에 비하여 일반적으로 대단히 크기 때문에 이 연구에서는 제 1차 모드의 횡변위에 대해서 고찰하였다. 수치해석 예제에 사용한 단순지지 보의 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

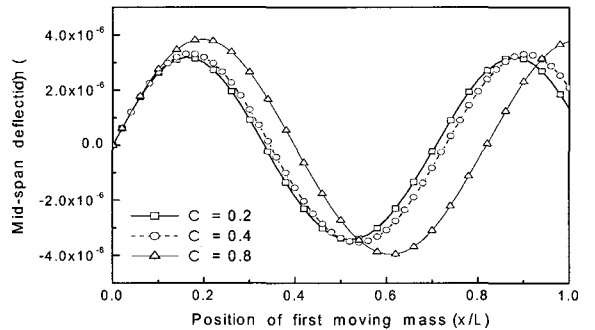
Table 1 Specifications of cracked simply supported beam

Property	Data
Total length of beam	2 (m)
Radius of beam	0.1 (m)
Velocity of moving mass	2 (m/s)
Young's modulus	$2.08 \times 10^{11}$ (N/m <sup>2</sup> )
Density	7860 (kg/m <sup>3</sup> )
Poisson ratio	0.3

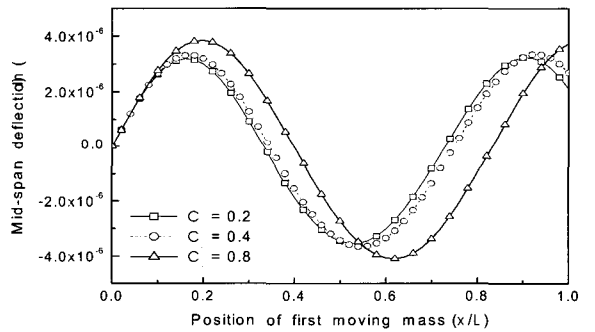
또, 무차원화된 이동질량들의 크기( $M_1 = M_2 = M_3$ )는 모두 0.1을 사용하였으며, 이동질량의 수가 2개, 3개인 경우 이동질량 사이의 간격  $A(=a/L)$ 는 0.2로 하여 해석하였다.



(a)



(b)

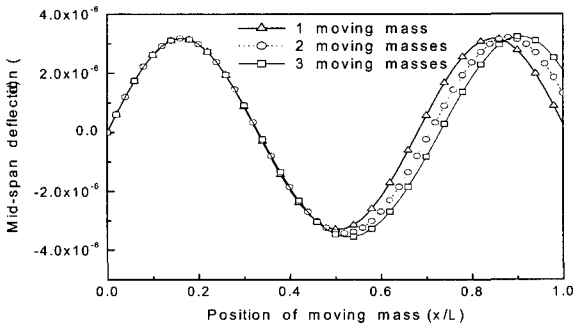


(c)

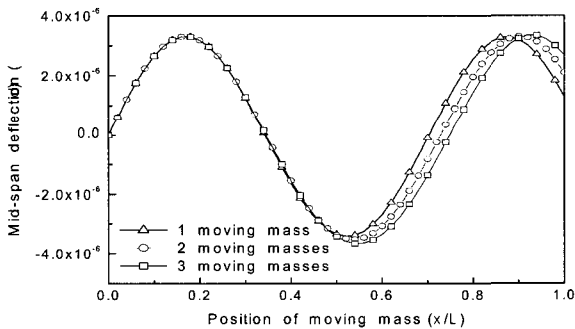
Fig. 2 Mid-span deflection of the cracked simply supported beam with the moving mass according to the crack depth ratio ( $M_k=0.1, x_c/L=0.4$ ).

Fig. 2는 크랙이 존재하는 위치( $x_c/L$ )가 단순지지 보의 0.4인 지점에 존재하는 경우 크랙의 깊이  $C_D(=a_c/R)$ 에 따른 단순지지 보의 횡변위를 도시한 것이다. Fig. 2 (a), Fig. 2 (b), 그리고 Fig. (c)는 각각 이동질량의 수가 1개, 2개, 그리고 3개인 경우를 나타낸다. 전반적으로 이동질량의 영향에 관계없이 단순지지 보의 최대 횡변위는 크랙의 깊이와 서로 비례적이다. Fig. 2 (a)의 이동질량이 1개 일 때, 이동질량의 위치가 보의 전반부를 이동하는 동안은 크랙 깊이와 단순지지 보의 횡변위는 서로 비례적이다. 하지만, 이동질량이 보의 중앙을

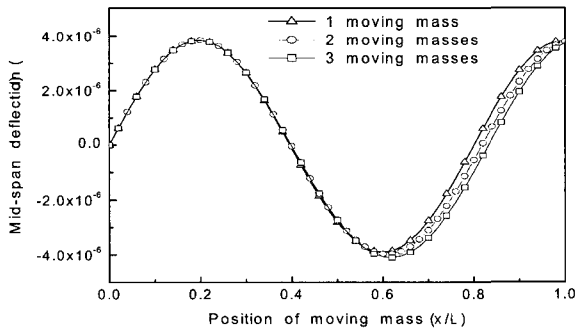
통과하면서부터 보의 약 80%를 지나는 동안은 단순지지 보의 횡변위와 크랙 깊이는 서로 반비례적인 경향을 보이고 있으며, 크랙의 깊이가 클수록 최대 횡변위를 일으키는 이동질량의 위치가 보의 오른쪽으로 조금씩 이동되어짐을 알 수 있다. Fig. 2 (b)의 이동질량이 2개 일 때를 살펴보면, 크랙 깊이가 0.2인 경우에 비해 크랙 깊이가 0.4인 경우 단순지지 보의 최대 횡변위가 약 3.55% 정도, 크랙 깊이가 0.8 일 때는 횡변위가 약 17.15% 정도 증가함을 알 수 있다. Fig. 2 (c)의 이동질량이 3개 인 경우, Fig. 2 (a), (b)와 전반적으로 유사한 경향을 나타내고 있다.



(a)

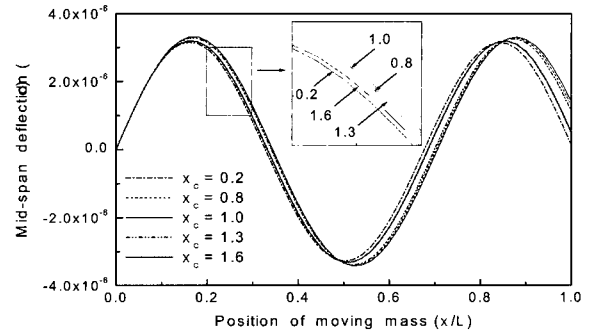


(b)

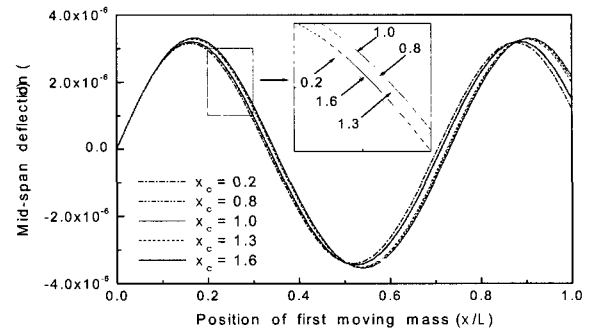


(c)

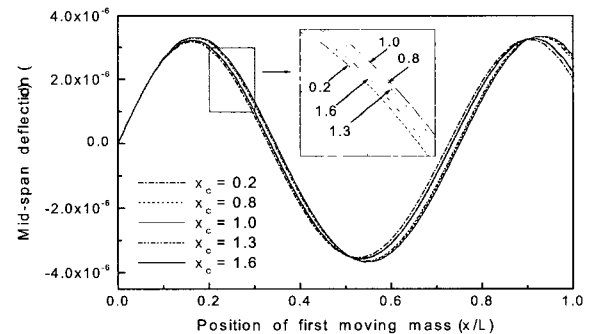
Fig. 3 Mid-span deflection of the cracked simply supported beam with the moving mass ( $M_k=0.1$ ,  $x_c/L=0.4$ ) (a)  $C_D = 0.2$ , (b)  $C_D = 0.4$ , (c)  $C_D = 0.8$



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Mid-span deflection of the cracked simply supported beam with the moving mass according to the crack position ( $M_k=0.1$ ,  $a_c/R=0.4$ ) (a) 1 moving mass, (b) 2 moving masses, (c) 3 moving masses

Fig. 3 은 크랙의 깊이가 일정한 경우 이동질량의 수에 따른 단순지지 파이프의 횡변위를 나타낸 것이다. Fig. 3 (a)는 크랙의 깊이가 0.2인 경우에 이동질량의 수에 따른 단순지지 보의 횡변위를 나타낸 것으로, 단순지지 보의 횡변위는 이동질량의 수에 관계없이 이동질량의 위치가 보의 45%를 지날 때까지는 거의 같은 값을 보이고 있다. 하지만 그 이후 이동질량이 보의 87%를 지나는 동안은 전반적으로 이동질량의 수가 많을수록 단순지지 보의 횡변위는 더 큼을 알 수 있다. Fig. 3 (c)의 이

동질량이 3개일 때는 이동질량의 위치가 보의 56%를 지날 때까지 이동질량에 관계없이 단순지지 보의 횡변위는 거의 같은 값을 가지고 있으며, 이동질량이 보의 끝단에 위치하는 경우에도 거의 같은 횡변위를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 는 크랙의 깊이가 0.4인 경우 크랙의 위치에 따른 단순지지 보의 1차 모드 횡변위를 나타내었다. 이동질량의 수와 관계없이 Fig. 4 (a)~(c) 모두 크랙이 단순지지 보의 중앙 부근에 존재하는 경우가 양 끝단 부근에 위치하는 경우에 비해 더 큰 횡변위를 보이고 있다. Fig. 4 (b)의 이동질량이 2개인 경우를 살펴보면, 첫 번째 최대 횡변위가 나타나는 이동질량의 위치는 단순지지 보의 약 18%를 지날 때이고, 두 번째 최대 횡변위가 나타나는 지점은 크랙의 위치가 단순지지 보의 중앙 부분에 존재하는 경우에는 첫 번째 이동질량의 위치가 보의 약 90%를 지나면서 나타나며, 크랙의 위치가 단순지지 보의 양 끝단 부근에 존재하는 경우는 이동질량의 위치가 보의 약 86% 지점을 지날 때 나타난다.

## 5. 결 론

항만 등에서 이용되는 컨테이너 크레인과 같은 이동질량을 가지는 보 형태의 구조물에 크랙과 같은 결함이 존재할 때 보 구조물의 횡진동 특성에 미치는 이동질량 및 크랙의 크기, 크랙 위치의 영향을 수치해석 하였다. 이론전개에서 크랙에 의해 부가되는 변형에너지는 유연행렬을 구하여 전체 계에 적용하였으며, 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였다.

연구결과를 요약하면, 이동질량의 영향에 관계없이 단순지지 보의 최대 횡변위는 크랙의 깊이와 서로 비례적이며, 크랙이 단순지지 보의 중앙 부근에 존재하는 경우가 양 끝단 부근에 위치하는 경우에 비해 더 큰 횡변위를 보였다. 또, 크랙의 깊이가 일정한 경우, 이동질량이 보의 전반부를 이동하는 동안은 거의 유사한 횡변위를 보이지만 이동질량이 보의 후반부를 이동하는 동안은 이동질량의 수와 단순지지 보의 횡변위는 서로 비례적인 경향을 보인다.

이러한 연구결과를 바탕으로 이동질량을 가지는 보 형태의 구조물의 진동특성을 관찰함으로써 크랙과 같은 결함의 존재 유무 및 위치를 파악하여 구조물의 효율적인 안전진단에 기여할 수 있을 것으로 판단되어 진다.

## 참 고 문 헌

손유식, 김영복 (2000). "컨테이너 크레인의 흔들림 방지 개발에

- 관한 연구", 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 35-42.
- 윤한익 (2001). "단순지지 송수관의 동특성에 미치는 이동질량의 영향", 한국해양공학회지, 제15권, 제2호, pp 135-140.
- 윤한익, 손인수, 김현수, 조정래 (2002). "노즐경사각을 고려한 이동질량을 가진 유체이송 외팔 파이프의 동특성 해석", 한국해양공학회지, 제16권, 제6호, pp 18-24.
- Chondros, T. G. (1977). "Dynamic Response of Cracked Beams", Dipl. Engng Theis, University of Patras, Greece.
- Chondros, T. G., Dimarogonas, A. D. and Yao, J. (1998). "A Continuous Cracked Beam Vibration Theory", Journal of Sound and Vibration, Vol 215, No 1, pp 17-34.
- Datta, P. K. and Lal, M. K. (1992). "Parametric Instability of a Non-prismatic Bar with Localized Damage Subjected to an Intermediate Periodic Axial Load", Computers and Structures, Vol 4, No 6, pp 1199-1202.
- Dimarogonas, A. D. (1996). "Vibration of Cracked Structures : A State of The Art Review", Engineering Fracture Mechanics, Vol 55, No 5, pp 831-857.
- Kim K. H. and Kim J. H. (2000). "Effect of A Crack on The Dynamic Stability of A Free-free Beam Subjected to A Follower Force", Journal of Sound and Vibration, Vol 233, No 1, pp 119-135.
- Mahmoud, M. A. and Abou Zaid, M. A. (2002). "Dynamic Response of a Beam with a Crack Subject to a Moving Mass", Journal of Sound and Vibration, Vol 256, No 4, pp 591-603.
- Nikpour, K. (1990). "Buckling of Cracked Composite Columns", Int. Journal of Solids and Structures, Vol 26, No 12, pp 1371-1386.
- Ruotolo, R., Surace, C., Crespo, P. and Storer, D. (1996). "Harmonic Analysis of the Vibration of a Cantilevered Beam with a Closing Crack", Computers and Structures, Vol 61, No 6, pp 1057-1074.

2003년 6월 30일 원고 접수

2003년 10월 15일 최종 수정본 채택