

크랙을 가진 단순지지 보의 동특성에 미치는 이동질량의 영향

Influence of Serial Moving Masses on Dynamic Behavior of a Simply Support Beam with Crack

°손인수* · 조정래** · 윤한익†

In-Soo Son, Jeong-Rae Cho and Han-Ik Yoon

Key Words : Moving Mass(이동질량), Open Crack(개구형 크랙), Euler-Bernoulli Beam Theory(오일러-베르누이 보이론), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Flexibility Matrix(유연행렬).

ABSTRACT

An iterative modal analysis approach is developed to determine the effect of transverse open cracks on the dynamic behavior of simply supported Euler-Bernoulli beams with the moving masses. The influences of the velocities of moving masses, the distance between the moving masses and a crack have been studied on the dynamic behavior of a simply supported beam system by numerical method. The presence of crack results in large deflection of beam. The crack section is represented by a local flexibility matrix connecting two undamaged beam segments i.e. the crack is modelled as a rotational spring. This flexibility matrix defines the relationship between the displacements and forces across the crack section and is derived by applying fundamental fracture mechanics theory. Totally, as the velocity of the moving masses and the distance between the moving masses are increased, the mid-span deflection of simply supported beam with the crack is decreased.

1. 서론

크랙과 같은 결함을 갖는 구조물에 어떤 하중이나 외력이 작용되면 크랙을 기점으로 해서 그 이상으로 힘이 증가하지 않고 급격히 균열이 전파되어 파괴된다. 이처럼 구조손상의 하나인 크랙은 구조물의 진동특성과 안정성을 변화시켜 구조물의 불안정 및 파괴의 주요 원인이 된다. 따라서 크랙의 존재를 사전에 감지하고 위험을 예방하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 구조물에 손상을 주지 않고 결함을 탐지해 낼 수 있는 비파괴적인 방법은 경제적으로나 편의성 측면에서 매우 효과적이라 할 수 있다. 이러한 비파괴적인 방법 중의 하나가 구조물이나 시스템의 고유진동특성 변화를 측정하여 크랙의 존재, 위치 및 크기를 탐지하는 것이다⁽¹⁾. 즉, 크랙을 가지는 구조물의 동적특성을 파악하는 것은 구조물의 안전진단 및 사고예방을 위해 중요

한 문제라고 할 수 있다. 일반적으로 구조물에 크랙형태의 결함이 있는 경우 구조물의 강성이 저하되는 경향을 보이고, 따라서 고유진동수는 감소하며 모드 형상의 변화가 발생한다⁽²⁾. 크랙이 구조물의 동적특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 초기에는 구조물에서 단지 크랙이 존재하는 부분의 강성을 줄이는 방법⁽³⁾이 시도되었고, 최근에는 유연행렬을 이용하여 크랙에 의해서 추가되는 에너지를 고려하는 해석 방법을 사용하고 있다⁽⁴⁾⁽⁶⁾.

크랙을 가지는 보 형태의 구조물의 해석은 오일러-베르누이 보 이론을 적용한 연구^(7,8)와 티모센코 보 이론을 적용하여 크랙이 전체 구조물의 동적특성에 미치는 영향에 대하여 많은 연구 결과가 발표되고 있다^(9,10). 또, Bannios⁽¹¹⁾ 등은 크랙과 하중의 위치에 따른 외팔 보의 동적특성을 연구하였으며, Mahmoud⁽¹²⁾ 등은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 집중질량을 가진 크랙 단순보의 동적응답을 전달행렬법으로 해석하였다. 또, 크랙이 존재하는 복합재료 보의 동적특성에 대한 연구^(1,13)와 이동질량의 영향을 받는 유체유동 파이프의 진동특성에 대해서도 많은 연구결과가 발표되어지고 있다^(14,15).

이 연구에서는 산업현장 등에서 생산된 제품이 다음 공정

† 책임저자, 정회원, 동의대학교 기계산업정보공학부

E-mail : hiyoon@dongeui.ac.kr

Tel: (051)880-1645 Fax: (051)880-2232

* 정회원, 동의대학교 대학원 기계공학부

** 경북직업전문학교 자동차과

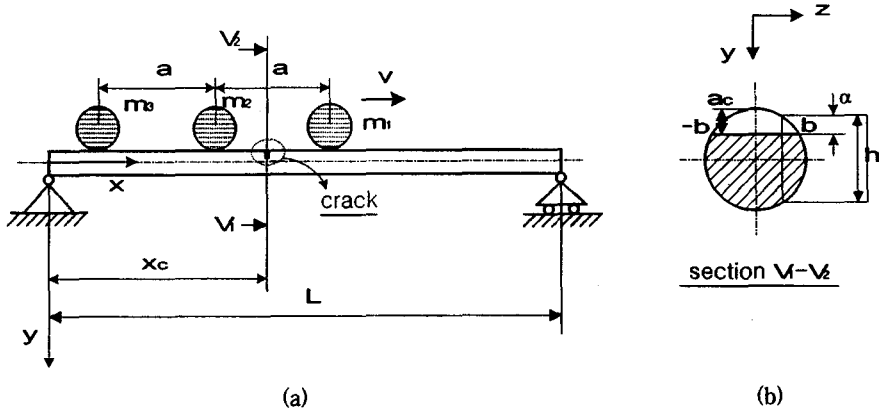


Fig. 1 Geometry of the cracked simply supported beam with the moving masses

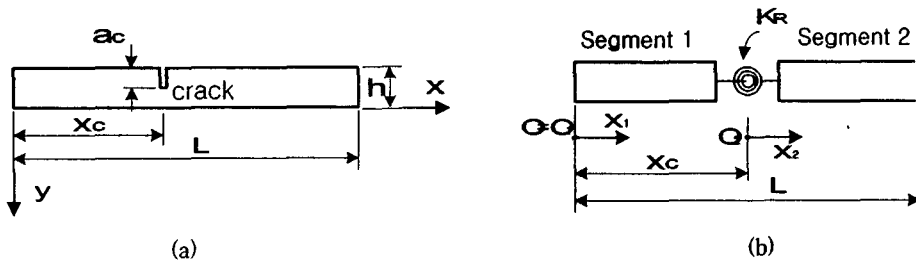


Fig. 2 Modeling of a cracked element

으로 이동할 때 이용되는 컨베이어형 구조물을 고려한 것이다. 즉, 연속된 이동질량을 가지는 단순지지 보가 진전이 없는 개구형 크랙이 존재할 때 이동질량이 보의 횡방향 진동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 단순지지 보의 해석은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였으며 크랙을 가지는 단순지지 보 위를 통과하는 이동질량의 속도와 그 사이의 간격이 보의 동특성에 미치는 영향을 수치해석 하였으며, 크랙이 존재하는 경우와 크랙이 존재하지 않는 경우의 횡진동을 서로 비교하였다.

2. 시스템 모델링

Fig. 1은 크랙을 가진 단순지지 보 위를 이동질량들이 일정한 속도와 간격을 가지고 연속적으로 이동하는 탄성계의 개략도를 나타내고 있다. 여기서 m_k 는 보 위를 이동하는 집중질량, v 는 집중질량의 속도, 그리고 L 은 보의 전체 길이를 나타낸다. 또, a 는 이동질량 사이의 간격을 의미하며 a_c , h , 그리고 b 는 각각 크랙의 깊이와 크랙이 존재하는 보 지름, 그리고 크랙의 길이를 표현하고 있다. Fig. 2는 크랙을 가지는 단순지지 보를 수학적 해석을 위해 간략히 모델링한 것이다. 단순지지된 보에서 크랙이 존재하는 위치를

기준으로 두 부분으로 구분하여 모델링 하였으며, x_c 는 크랙이 존재하는 위치를 나타낸다. Fig.2 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 크랙위치에서는 크랙의 영향에 의한 파괴역학적 변수를 구하여 보의 횡방향 진동에 영향을 미치는 등가의 회전 스프링(K_R) 상수로 변환하여 수치해석에 이용하였다. 연속 보 형태의 구조물에서 크랙에 의한 부분적인 강성저하는 불연속 구간을 초래하게되므로 크랙위치에서 별도의 경계조건을 설정해야한다.

2.1 단순지지 보 및 이동질량의 에너지 식

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

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

여기서, $q_i(t)$ 는 일반화 좌표, μ 는 일반화 좌표의 수를 나타낸다. 또, $\phi_i(x)$ 는 단순지지 보의 횡방향 진동의 모드 모양을 표현하고 있다. 따라서 크랙을 가진 단순지지된 보의 포텐셜 에너지를 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_p = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^2 \left[EI \int_0^{L_i} \{\phi''_{ij}(x) q_i(t)\}^2 dx - mg \int_0^{L_i} \phi_{ij}(x) q_i(t) dx \right] + \frac{1}{2} K_R (\Delta y'_c)^2 \quad (2)$$

여기서 K_R 은 크랙으로 인하여 부가되는 회전 스프링상수를 의미하며, E 는 영계수를 나타낸다. 또, j 는 외팔보의 분할구간(segment)의 수이며 $\Delta y'_c$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta y'_c = \frac{y_2(x_2=0)}{dx} - \frac{y_1(x_1=x_c)}{dx} \quad (3)$$

또, 단순지지 보의 운동에너지를 구하면 다음과 같다.

$$T_p = \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \int_0^{L_i} \{\dot{\phi}_{ij}(x) \dot{q}_i(t)\}^2 dx \quad (4)$$

이동질량들은 단순지지 보와 분리되지 않고 접촉된 상태로 이동한다고 가정하였으며, 따라서 이동질량들의 연직방향 변위와 속도를 이용하여 이동질량들의 운동에너지와 포텐셜 에너지를 구하면 각각 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$V_m = - \sum_{k=1}^3 \left[m_k g \sum_{i=1}^6 \{\phi_i(x_k) q_i(t)\} \right] \quad (5)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \left[m_k \left\{ v^2 \sum_{i=1}^6 q_i^2(t) \phi_i^2[f_k(t)] + 2v \sum_{i=1}^6 q_i(t) \dot{q}_i(t) \phi_i[f_k(t)] \dot{\phi}_i[f_k(t)] + \sum_{i=1}^6 \dot{q}_i^2(t) \phi_i^2[f_k(t)] \right\} + v^2 m_k \right] \quad (6)$$

여기서 $f_k(t)$ 는 이동질량들의 수평변위를 나타낸다.

2.2 크랙에 의한 탄성변형 에너지

선형 탄성구간에서 크랙으로 인한 부가적인 변형에너지(additional strain energy)는 응력확대계수의 항에서 유도할 수 있는 유연행렬의 형식으로 구할 수 있다. 같은 하중이 작용하는 구조물에서도 크랙이 존재하는 경우에 구조물의 자체 탄성 변형에너지 외에 크랙에 의한 변형에너지가 존재하고 이 부가 에너지만큼 추가적인 변형이 더 발생하게 된다. Castigliano의 정리에 의하여 크랙에 의해서 부가되는 변위와 크랙 부분의 유연행렬은 각각 다음과 같이 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 방향에서의 힘으로 $i=1, 2, \dots, 6$ 이고, $J(a)$ 는 응력확대계수(stress intensity factor)로서 다음과

같다.

$$J(a) = \frac{1}{E^*} \left[\left(\sum_{i=1}^6 K_{Ri} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 K_{Mi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^6 K_{Ii} \right)^2 \right] \quad (9)$$

여기서 E^* 은 평면변형에 대하여 $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$ 로 표현된다. 또, K_{Ri} , K_{Mi} 그리고 K_{Ii} 는 각각 제 1 파괴모드(개구형), 제 2 파괴모드(면내전단형), 그리고 제 3모드(면의 전단형)를 의미한다. 굽힘모드에 대해서 응력확대계수는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$J(a) = \frac{1}{E^*} [(K_{IM} + K_{IP})^2 + (K_{II})^2] \quad (10)$$

실축 원형단면인 경우 식 (10)의 각 요소는 다음과 같다.

$$K_{IP} = \frac{2V}{\pi R^4} L \sqrt{R^2 - z^2} \sqrt{\pi a} F_I(a/h) \\ K_{IM} = \frac{4M}{\pi R^4} \sqrt{R^2 - z^2} \sqrt{\pi a} F_I(a/h) \\ K_{II} = \frac{xV}{\pi R^2} \sqrt{\pi a} F_{II}(a/h) \quad (11)$$

여기서 V, M 은 각각 힘과 모멘트이고, x 는 실축 원형단면의 전단상수(shearing coefficient)로서 $x = \frac{6(1+\nu)}{7+6\nu}$ 로 표현된다. 또, ν 는 프와송 비를 나타내며, $F_I(a/h)$ 와 $F_{II}(a/h)$ 는 각각 다음과 같다.

$$F_I(a/h) = (\tan \zeta / \zeta)^{1/2} \frac{[0.923 + 0.199(1 - \sin \zeta)^4]}{\cos \zeta} \\ F_{II}(a/h) = \frac{[1.122 - 0.561(a/h) + 0.085(a/h)^2 + 0.18(a/h)^3]}{(1 - a/h)^{1/2}} \quad (12)$$

여기서 $\zeta = \frac{\pi a}{2h}$ 이다. 따라서, 식 (10)~(12)를 식 (8)에 대입하면 유연행렬(6×6)을 얻을 수 있으며, 해석에 필요한 회전 스프링 상수는 이 행렬의 역수를 취함으로써 구할 수 있다. 또, 크랙위치에서 다음의 4가지 경계조건을 만족해야 한다.

$$\phi_1(x) = \phi_2(x), \quad \frac{d^2 \phi_1(x)}{dx^2} = \frac{d^2 \phi_2(x)}{dx^2}, \quad (13)$$

$$\frac{d^3 \phi_1(x)}{dx^3} = \frac{d^3 \phi_2(x)}{dx^3},$$

$$\frac{d\phi_2(x)}{dx} - \frac{d\phi_1(x)}{dx} = \frac{EI}{K_R} \frac{d^2 \phi_2(x)}{dx^2}. \quad (14)$$

$$\phi(x) = \begin{cases} \phi_1(x) : 0 \leq x \leq x_c \\ \phi_2(x) : x_c \leq x \leq L \end{cases}$$

2.3 계의 운동방정식

계의 운동방정식은 식 (2) ~ 식 (6)의 에너지 식을 Lagrange 방정식에 대입하여 구할 수 있으며, 운동방정식을 무차원화하기 위하여 무차원 매개변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L}, \quad \xi_j = \frac{\xi_j}{L} \quad (j=1,2), \quad \xi_c = \frac{x_c}{L}, \\ d &= \frac{a}{L}, \quad \beta_k = \frac{m_k L}{\sqrt{mEI}} \bar{v}, \quad \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \\ \gamma_k &= \frac{m_k L^3}{EI} \bar{v}^2, \quad M_k = \frac{m_k}{mL}, \quad m_k^* = \frac{m_k g L^2}{EI}, \\ K_R^* &= \frac{K_R L}{EI}, \quad M^* = \frac{m g L^3}{EI}, \quad A = \frac{a}{L}. \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 \bar{v} 는 v/L 이다. 식 (16)의 무차원 매개변수를 이용하여 계의 무차원화된 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \sum_{j=1}^2 \int_0^1 \phi_{ij}''(\xi) d\xi + \sum_{k=1}^3 M_k \phi_i^2(\bar{x}_k) \right\} \ddot{d}_i(\tau) \right. \\ & + \left\{ \sum_{k=1}^3 M_k \frac{d}{d\tau} [\phi_i^2(\bar{x}_k)] \right\} \dot{d}_i(\tau) \\ & + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^2 \int_0^1 \{ \phi_{ij}''(\xi) \}^2 d\xi + \sum_{k=1}^3 \left\{ \beta_k \frac{d}{d\tau} (\phi_i(\bar{x}_k)) \phi_i(\bar{x}_k) \right. \right. \\ & \left. \left. - \gamma_k \{ \phi_i(\bar{x}_k) \}^2 + \beta_k \frac{d}{d\tau} (\phi_i(\bar{x}_k)) \phi_i(\bar{x}_k) \right\} \right. \\ & + K_R^* \{ \{ \phi_{2i}(\xi_2=0) \}^2 - 2 \{ \phi_{2i}(\xi_2=0) \} \phi_{1i}(\xi_1 = \xi_c) \} \\ & \left. + \{ \phi_{1i}(\xi_1 = \xi_c) \}^2 \right] d_i(\tau) \\ & - \sum_{i=1}^n \left\{ M^* \int_0^1 \phi_i(\xi) d\xi + \sum_{k=1}^3 m_k^* \phi_i(\bar{x}_k) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 (\cdot) 는 무차원화된 시간 τ 에 대한 미분을 나타내고, (\cdot') 는 무차원 매개변위 ξ 에 대한 미분을 표현한 것이다. 또, 무차원화된 이동질량의 수평변위 \bar{x}_k 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \bar{v} L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau \\ \bar{x}_2 &= \bar{v} L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau - A \\ \bar{x}_3 &= \bar{v} L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau - 2A \end{aligned} \quad (17)$$

3. 수치해석 결과 및 고찰

이 연구에서는 이론해석에서 유도된 무차원 운동방정식을 이용하여 이동질량의 속도 및 이동질량 사이의 간격이 크랙이 존재하는 단순지지 보의 횡방향 진동에 미치는 영향과 크랙이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 진동특성을 수치해석을 통해 비교, 고찰하였다. 수치해석은 Matlab(6.1)에서 4차의 Runge-Kutta 방법⁽¹⁶⁾으로 수행하였으며, 수치해석에

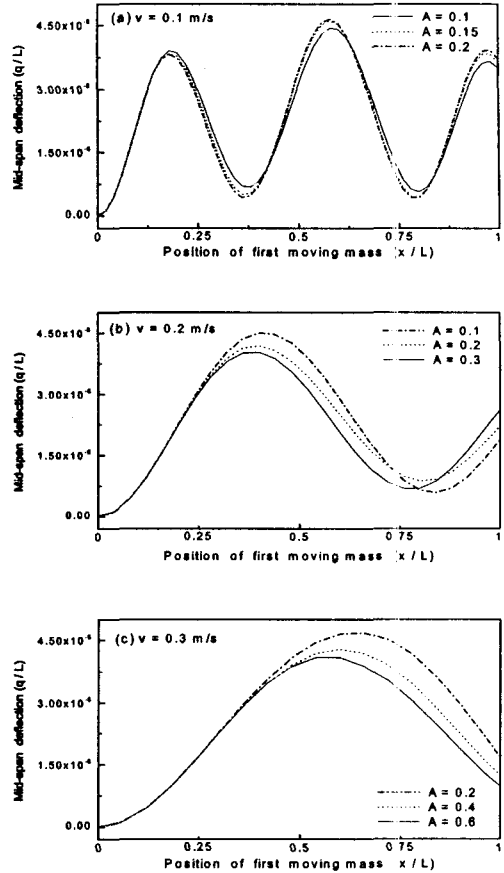


Fig. 3 Mid-span deflection of the cracked simply supported beam with moving masses ($M_k=0.1$), with crack depth $a_c/h = 0.2$ and crack position $x_c/L=0.25$.

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 보의 파라미터는 참고문헌(17)의 파라미터를 사용하였다. 즉, 보 길이는 0.2m, 반지름은 0.01m, 영계수 $E = 200$ GPa, 그리고 단순지지 보의 밀도는 7850 kg/m^3 으로 하였다. 또, 크랙의 위치는 보의 25% 지점에 고려하였으며, 그 깊이($\frac{a_c}{h}$)는 0.2로 하였다. 또, 이동질량들의 크기는 모두 같은 크기($M_k = 0.1$)를 사용하여 해석하였다.

Fig. 3은 이동질량들 사이의 간격에 따른 단순지지 보의 횡변위를 첫 번째 이동질량의 위치에 따라 표현하였다. Fig. 3(a)는 이동질량의 속도가 0.1 m/s 인 경우 이동질량 사이의 간격에 대하여 보 횡변위를 도시하였다. 첫 번째 이동질량이 보의 약 14%를 지날 때까지는 이동질량 사이의 간격

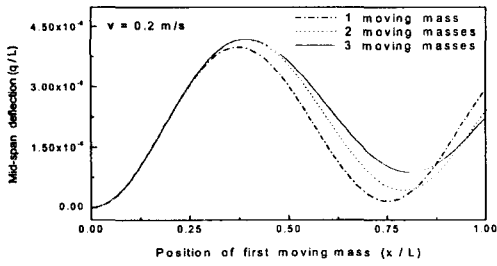


Fig. 4 Mid-span deflection of the cracked simply supported beam with moving masses ($M_k=0.1$), with crack depth $a_c/h = 0.2$ and crack position $x_c/L=0.25$.

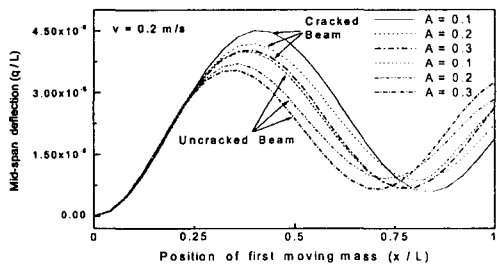


Fig. 5 Comparison between the mid-span deflection of cracked pipe and uncracked beam for simply supported pipe with moving masses ($M_k=0.1$), with $v = 0.2$ m/s.

에 관계없이 거의 유사한 횡변위를 나타내지만 첫 번째 이동질량의 위치가 보의 약 14% ~ 44% 지점을 통과하는 동안은 이동질량 사이의 간격이 좁을수록 더 큰 횡변위를 가진다. 또, 그 이후 62% 지점을 지날 때까지는 오히려 이동질량들 사이의 간격이 넓을수록 보는 더 큰 횡변위를 보이고 있다. 첫 번째 이동질량이 보 끝단까지 이동하는 동안 구간별로 이러한 현상이 반복됨을 볼 수 있다. 또한 전체적으로 보의 최대 횡변위는 이동질량이 보의 60% 지점을 통과할 때 나타난다. Fig. 3 (b)는 이동질량의 속도가 0.2 m/s 인 경우 이동질량 사이의 간격에 따른 보의 횡변위를 나타낸 것이다. 첫 번째 이동질량의 위치가 보의 약 75% 지점을 지날 때까지는 이동질량 사이의 간격이 좁을수록 횡변위가 더 크게 나타난다. 그리고, 단순지지 보의 최대 횡변위는 첫 번째 이동질량의 위치가 보의 40% 지점을 지날 때 나타난다. Fig. 3 (c)는 이동질량의 속도가 0.3 m/s 인 경우 첫 번째 이동질량의 위치에 따른 보의 횡변위를 이동질량 사이의 간격에 대하여 표현한 것이다. 보의 최대 횡변위는 첫 번째 이동질량이 보의 약 60% 지점을 지나면서 나타나지만 이동질량 사이의 간격이 좁을수록 횡변위가 더 크고, 보의 최대 횡변위는 첫 번째 이동질량이 좀더 보의 후방에 위치해 있을 때 나타난다.

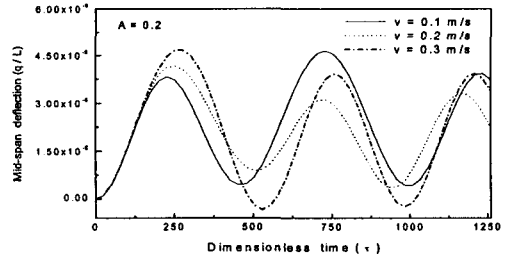


Fig. 6 Mid-span deflection of the cracked simply supported beam with moving masses ($M_k=0.1$) versus time, with $A=0.2$, $a_c/h = 0.2$ and $x_c/L=0.25$.

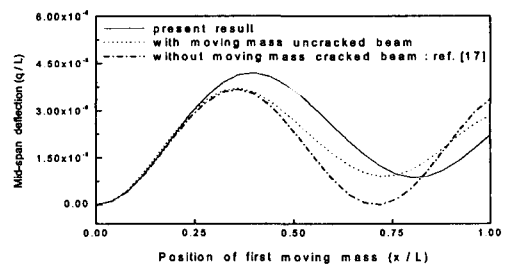


Fig. 7 Mid-span deflection of the simply supported beam.

Fig. 4는 이동질량의 속도가 0.2 m/s 인 경우 연속된 이동질량의 수에 대한 단순지지 보의 횡변위를 도시한 것이다. 첫 번째 이동질량이 보의 80%를 통과할 때까지는 이동질량의 수와 보 횡변위는 서로 비례적이다. 하지만 이동질량이 보 끝에 위치해 있을 때는 서로 반비례적임을 알 수 있다. 또한 이동질량이 2개 일 때와 3개 일 때 보의 최대 횡변위는 거의 같은 값을 가지며, 이동질량의 수가 많을수록 최대 횡변위가 나타나는 지점은 첫 번째 이동질량의 위치가 보의 후방으로 이동되어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 이동질량의 속도가 0.2 m/s 일 때 이동질량의 사이의 간격에 따른 단순지지 보의 횡변위를 크랙이 존재하는 경우와 크랙이 없는 경우를 서로 비교한 것이다. 첫 번째 이동질량이 보의 20%를 지나기 전까지의 보 횡변위는 모두 거의 비슷한 크기를 나타내지만 75%를 지나기까지는 크랙이 존재할 때, 이동질량 사이의 간격이 좁을수록 단순지지 보의 횡변위는 더 큰 값을 가진다. 하지만 그 이후는 반대의 경향을 보인다. 크랙이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 단순지지 보의 최대 횡변위는 크랙이 존재할 때 약 12% 정도 더 큰 값을 나타낸다.

Fig. 6은 이동질량들 사이의 무차원 간격(A)이 0.2인 경우에 이동질량의 속도에 따른 단순지지 보의 횡변위를 무차원 시간 변화에 따라 나타내었다. 무차원 시간 440을 지나기까지는 이동질량의 속도가 빠를수록 횡변위가 크게 나

타나지만 그 이후는 전반적으로 이동질량의 속도가 작을수록 더 큰 횡변위를 보인다. 이동질량의 속도가 0.2m/s 인 경우를 살펴보면 첫 번째 이동질량들이 보 위를 떠나는 무차원 시간($vt = L$)은 약 630 이고, 마지막 세 번째 이동질량이 보 위를 떠나는 시간은 약 880 이다. 이동질량들이 보 위를 떠난 후에는 일정한 횡변위를 가진다.

Fig. 7 은 이동질량이 없는 크랙 단순지지 보의 횡진동과 현재의 수치해석 결과를 서로 비교한 것이다. 이동질량이 있는 경우 이동질량의 속도는 0.2 m/s, 이동질량 사이의 간격은 0.2, 그리고 이동질량의 크기는 0.1 을 사용하였다. 전반적으로 유사한 형태의 보 횡변위를 보여주고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

이동질량을 가지는 보 구조물에 크랙 형태의 결함이 존재할 때 보 구조물의 횡진동 특성에 미치는 이동질량의 영향을 수치해석 하였다. 이론전개에서 크랙에 의해 부가되는 변형에너지는 유연행렬을 구하여 전체 계에 적용하였으며, 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였다. 연구결과로 단순지지 보에 크랙이 존재할 때 보의 횡변위가 약 12% 정도 증가하였고, 이동질량 사이의 간격이 좁을수록 단순지지 보의 횡변위가 더 크게 나타났으며, 단순지지 보의 최대 횡변위가 나타나는 지점은 전반적으로 첫 번째 이동질량의 위치가 보의 후방으로 이동되어 위치할 때 나타남을 알 수 있다.

이러한 연구결과를 바탕으로 컨베이어와 같이 이동질량을 가지는 구조물의 진동형태에서 크랙과 같은 결함의 존재 여부를 파악하는데 도움이 될 수 있을 것이며, 이동질량의 속도와 간격을 적절히 조정함으로써 구조물의 최적 안정조건을 파악하는데 기여할 것으로 기대되어진다.

참 고 문 헌

(1) 하태완, 송오섭, 1999, "크랙이 존재하는 복합재료 보의 동적 특성 연구" 한국소음진동공학회지, 제 9 권, 제 5 호, pp. 1019~1028.
 (2) Nikpour, K., 1990, "Buckling of Cracked Composite Columns," *Int. Journal of Solids and Structures*, Vol. 26, No. 12, pp. 1371~1386.
 (3) 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," *Computer and Structures*, Vol. 4, No. 6, pp. 1199~1202.
 (4) Ruotolo, R., Surace, C., Crespo, P. and Storer, D., 1996, "Harmonic Analysis of The Vibrations of a Cantilevered Beam With a Closing Crack," *Computers &*

Structures, Vol. 61, No. 6, pp. 1057~1074.

(5) Ghondros, 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.

(6) Tsai, T. C. and Wang, Y. Z., 1997, "The Vibration of a Mult-Crack Rotor," *Int. Journal of Mech. Sci.* Vol. 39, No. 9, pp. 1037~1053.

(7) Bannios, Y., Douka, E. and Trochidis, A., 2002, "Crack Identification in Beam Structures Using Mechanical Impedance," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 256, No. 2, pp. 287~297.

(8) Zheng, D. Y. and Fan, S. C., 2001, "Natural Frequency Changes of a Cracked Timoshenko Beam by Modified Fourier Series," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246, No. 2, pp. 297~317.

(9) Takahashi, I., 1997, "Vibration and Stability of a Cracked Shaft Simultaneously Subjected to a Follower Force With an Axial Force," *Int. Journal of Solids and Structures*, Vol. 35, No. 23, pp. 3071~3080.

(10) 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.

(11) Bannios, G. and Trochides, A., 1995, "Dynamic Behaviour of a Cracked Cantilever Beam," *Applied Acoustics*, Vol. 45, pp. 97~112.

(12) 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.

(13) Krawczuk, M., Ostachowicz, W., and Żak, A., 1997, "Modal Analysis of Cracked, Unidirectional Composite Beam," *Composites Part B*, 28B, pp. 641~650.

(14) 윤한익, 손인수, 진종태, 김현수, 2002, "유체유동 외팔 파이프의 고유진동수에 미치는 설계인자의 영향," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 11 호, pp. 840~846.

(15) 윤한익, 임순홍, 2002, "이동질량들을 가진 단순지지된 유체유동 파이프의 동특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 2 호, pp. 132~140.

(16) MATLAB Reference Guide, 1992, The Math Works, Inc.

(17) Fernández-Sáez, L., Rubio, L. and Navarro, C., 1999, "Approximate Calculation of the Fundamental Frequency for Bending Vibrations of Cracked Beams," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 225 No. 2, pp. 345~352.