

티모센코 보이론을 적용한 크랙을 가진 유체유동 파이프의 동특성에 관한 연구

A Study on the Dynamic Behavior of Cracked Pipe Conveying Fluid Using Theory of Timoshenko Beam

손인수* · 안성진* · 윤한익**

In-Soo Son, Sung-Jin Ahn and Han-Ik Yoon

Key Words : Moving Mass(이동질량), Open Crack(개구형 크랙), Timoshenko Beam Theory(티모센코 보이론), Flexibility Matrix(유연행렬), Pipe Conveying Fluid(송수관)

ABSTRACT

In this paper a dynamic behavior of simply supported cracked pipe conveying fluid with the moving mass is presented. Based on the Timoshenko beam theory, the equation of motion can be constructed by using the Lagrange's equation. 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. And the crack is assumed to be in the first mode of fracture. As the depth of the crack and velocity of fluid are increased the mid-span deflection of the pipe conveying fluid with the moving mass is increased. As depth of the crack is increased, the effect that the velocity of the fluid on the mid-span deflection appears more greatly.

1. 서론

크랙과 같은 결함을 갖는 구조물에 어떤 하중이나 외력이 작용되면 크랙을 기점으로 해서 그 이상으로 힘이 증가하지 않고 급격히 균열이 전파되어 파괴된다. 또, 파이프 속을 흐르는 유체는 파이프의 끝단에 집중중동력으로 작용하며 파이프의 동적특성에 큰 영향을 미친다. 이처럼 크랙과 유동유체는 구조물의 불안정 및 파괴의 주요 원인이 된다. 따라서 유동유체를 갖는 파이프에 크랙이 존재하는 구조물은 이러한 두 가지 불안정 요소를 모두 포함하고 있으므로 이들의 연성관계에 의한 시스템의 동적특성을 파악하는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 크랙의 존재 유무를 구조물에 손상을 주지 않고 결함을 탐지해 낼 수 있는 비파괴적인 방법의 하나로 구조물이나 시스템의 고유진동특성 변화를 측정하여 크랙의 존재, 위치 및 크기를 탐지할 수 있다. 하지만 유동유체의 영향을 고려하지 않는다면 정확한 결과를 얻기 어려울 것이다. 따라서 유동유체를 갖는 보형태 구조물에 크

랙의 존재를 사전에 감지하여 위험을 예방하고자 하는 경우 유체와 크랙의 연성관계의 연구는 필수적이다.

일반적으로 구조물에 크랙형태의 결함이 있는 경우 고유진동수는 감소하며 모드 형상의 변화가 발생한다⁽¹⁾. 최근 많은 연구자들은 구조물의 동특성에 미치는 크랙의 영향에 대하여 연구^(2~5)하였으나, 이들 연구는 오일러 보에 국한되어진 연구였다. 사실, 오일러 보에 비해 티모센코 보 이론에 적용할 때 보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있다⁽⁶⁾. 이러한 근거를 바탕으로 크랙을 가지는 보의 해석은 티모센코 보 이론을 적용하여 여러 형태의 보 구조물에 대한 연구결과가 발표되었다^(7~10). 또, Mahmoud⁽¹¹⁾ 등은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 이동질량을 가진 크랙 단순보의 동적응답을 전달행렬법으로 해석하였다.

이 연구에서 고려한 시스템은 이동질량과 유동유체를 갖는 파이프가 개구형 크랙(open crack)을 가지는 시스템이다. 이동질량을 갖는 단순지지 파이프의 굽힘변위에 미치는 유속과 크랙의 연성관계가 파이프의 동적특성에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 단순지지 파이프의 해석은 티모센코 보 이론을 적용하였으며 크랙을 가지는 파이프 위를 통과하는 이동질량의 속도가 파이프의 동특성에 미치는 영향에 대해서도 수치해석 하였다.

** 동의대학교 기계정보산업공학부
E-mail : hiyoon@dongeui.ac.kr
Tel : (051) 890-1645, Fax : (051) 890-2232
* 동의대학교 대학원 기계공학과

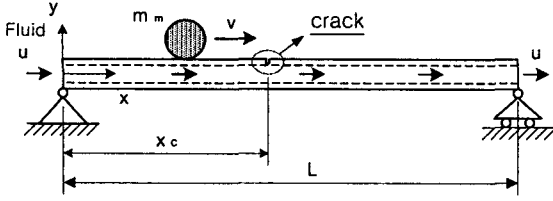


Fig. 1 Geometry of the cracked pipe with moving mass

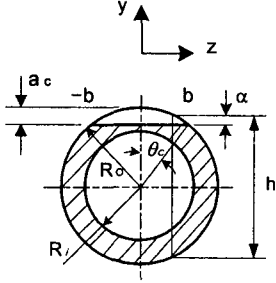


Fig. 2 Cross section of the cracked pipe

2. 시스템 모델링

Fig. 1은 크랙과 유체를 가진 단순지지 파이프 위를 이동 질량이 일정한 속도로 이동하는 탄성계의 개략도를 나타내고 있다. 여기서 m_m 은 파이프 위를 이동하는 이동질량, v 는 이동질량의 속도, 그리고 L 은 파이프의 전체 길이를 나타낸다. 또, u 는 유체의 속도이며, x_c 는 크랙의 위치이다. Fig. 2는 크랙이 존재하는 부분의 파이프 단면을 표현한 것이다. 여기서 a_c , h , 그리고 b 는 각각 크랙의 깊이와 크랙이 존재하는 파이프 단면지름, 그리고 크랙의 길이를 표현하고 있다. 또, θ_c 는 전체 크랙의 반각(half-angle)이다. 단순지지 파이프에서 크랙위치를 기준으로 두 부분으로 분리하여 모델링 하였으며, 크랙위치에서는 크랙의 영향에 의한 파괴역학적 변수를 회전스프링 상수(K_R)로 변환하여 수치 해석에 이용하였다.

2.1 단순지지 파이프 및 이동질량의 에너지 식

단순지지 파이프의 굽힘변위 $y(x, t)$ 와 xy 평면에서의 기울기 $\theta(x, t)$ 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

$$\theta(x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) d_i(t) \quad (2)$$

여기서, $q_i(t)$, $d_i(t)$ 는 일반화 좌표, μ 는 일반화 좌표의 수를 나타낸다. 또, $\phi_i(x)$ 와 $\varphi_i(x)$ 는 티모센코 보인 경우

에 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹²⁾.

$$\phi_i(x) = B_i \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right), \quad (3)$$

$$\varphi_i(x) = \cos\left(\frac{i\pi x}{L}\right)$$

where

$$B_i = \frac{i\pi L}{(i\pi)^2 - b_n^2 s^2}, \quad s^2 = \frac{EI}{xAGL^2}, \quad r^2 = \frac{I}{AL^2},$$

$$b_n^2 = \frac{1 + (i\pi)^2(r^2 + s^2) - \sqrt{(1 + (i\pi)^2(r^2 + s^2))^2 - 4(i\pi)^4 r^2 s^2}}{2r^2 s^2}$$

여기서 E 와 G 는 영계수 및 전단탄성계수를 나타내며, x 는 중공축 원형단면의 전단상수(shearing coefficient)로서 $x = \frac{2(1+\nu)}{(4+3\nu)}$ 로 표현된다⁽¹³⁾. 여기서 ν 는 프와송 비이다. 또, A 와 I 는 각각 파이프의 단면적 및 면적 2차 모멘트를 의미한다. 크랙을 가진 단순지지 파이프의 포텐셜 에너지를 티모센코 보 이론을 적용하여 구하면 다음과 같다.

$$V_p = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \int_0^{L_j} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial \theta_j}{\partial x_j} \\ \frac{\partial y_j}{\partial x_j} - \theta_j \end{array} \right]^T \begin{bmatrix} EI & 0 \\ 0 & xGA \end{bmatrix} \times \left[\begin{array}{c} \frac{\partial \theta_j}{\partial x_j} \\ \frac{\partial y_j}{\partial x_j} - \theta_j \end{array} \right] dx_j + \frac{1}{2} K_R (\Delta y'_c)^2 \quad (4)$$

여기서 K_R 은 각각 크랙으로 인하여 부가되는 회전스프링 상수를 의미한다. 또, j 는 크랙 파이프의 분할구간(segment)의 수이며, $\Delta y'_c$ 는 다음과 같다.

$$\Delta y'_c = \frac{dy(x_2=0)}{dx} - \frac{dy(x_1=x_c)}{dx} \quad (5)$$

단순지지 파이프의 운동에너지를 구하면 다음과 같다.

$$T_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \int_0^{L_i} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial y_i}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \end{array} \right]^T \begin{bmatrix} \rho A & 0 \\ 0 & \rho I \end{bmatrix} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial y_i}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \end{array} \right] dx_i \quad (6)$$

여기서 ρ 는 파이프의 밀도이다.

이동질량의 운동에너지는 다음과 같이 유도할 수 있다⁽⁵⁾.

$$T_m = \frac{1}{2} m_m \sum_{k=1}^n \{ v^2 q_k^2(t) \phi_{\dot{y}}^2[f_k(t)] + 2v q_k(t) \dot{q}_k(t) \phi_{\dot{y}}[f_k(t)] \phi_{\dot{y}}'[f_k(t)] + \dot{q}_k^2(t) \phi_{\dot{y}}^2[f_k(t)] + v^2 \} \quad (7)$$

여기서 $f_k(t)$ 는 이동질량의 수평변위를 나타낸다.

2.2 유체에 의한 에너지

파이프에 대한 유체의 상대속도가 u 이므로, 유체의 절대 속도에는 파이프의 운동이 포함되어야 한다. 유체의 속도를 구하여 유체운동의 운동에너지를 구하면 다음과 같다.

$$T_f = \frac{1}{2} m_f \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \left[\int_0^{L_i} \{ u^2 + 2u \phi_{\ddot{v}_i}(x_j) \phi'_{\ddot{v}_i}(x_j) q_i(t) \dot{q}_i(t) + \{ \phi_{\ddot{v}_i}(x_j) \dot{q}_i(t) \}^2 \} dx_j \right] \quad (8)$$

여기서, m_f 는 유체의 단위 길이당 질량이다.

유체운동의 분사력에 의하여 파이프에 작용되는 힘은 $x = L$ 인 끝단에 작용하는 집중점선중동력이 된다. 이러한 집중점선중동력에 의한 일은 그 보존력 성분에 의한 일과 비보존력 성분에 의한 일로 구분되며 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^2 \left[\int_0^{L_i} m_f u^2 \{ \phi'_{\ddot{v}_i}(x_j) q_i(t) \}^2 dx_j \right] \quad (9)$$

$$W_{nc} = - \sum_{i=1}^n m_f u^2 \phi_{\ddot{v}_i}(L) \phi_{\ddot{v}_i}(L) q_i^2(t) = 0 \quad (10)$$

2.3 크랙에 의한 탄성변형 에너지

선형 탄성구간에서 구조물에 크랙이 존재하는 경우 크랙 주위에 응력집중현상에 의하여 유연성이 증가하게 된다. Castigliano의 정리에 의하여 크랙에 의해서 부가되는 변위와 크랙 위치에서의 유연행렬을 구하면 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_i = \frac{\partial}{\partial P_i} \int_0^L J da \quad (11)$$

$$C_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} = \frac{\partial^2}{\partial P_i \partial P_j} \left[\int_{-b}^b \int_0^L J da dz \right] \quad (12)$$

여기서 P_i 는 i 방향에서의 일반화된 힘($i = 1, 2, \dots, 6$)이고, b 는 크랙의 길이를 나타낸다. 또, J 는 변형률 에너지 밀도 함수(strain energy density function)로써 제 1 파괴모드에 대해서 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$J = \frac{1}{E^*} (K_{IM} + K_{IP})^2 \quad (13)$$

여기서 E^* 는 평면변형에 대하여 $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$ 로 표현되며, K_{IP} , K_{IM} 는 각각 전단력과 모멘트에 의한 응력집중계수를 의미한다. 증공축 원형단면인 경우 각각 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

$$K_{IP} = \frac{V}{2\pi R t} \sqrt{\pi R \theta} F_i(\theta_c), \quad (14)$$

$$K_{IM} = \frac{M}{\pi R^2 t} \sqrt{\pi R \theta} F_b(\theta_c)$$

여기서 V , M 은 각각 힘과 모멘트이고, R 은 $(R_o + R_i)/2$ 를 의미한다. 또, $F_i(\theta_c)$, $F_b(\theta_c)$ 는 각각 다음과 같다.

$$F_i(\theta_c) = 1 + A_i \left[5.3303 \left(\frac{\theta_c}{\pi} \right)^{1.5} + 18.773 \left(\frac{\theta_c}{\pi} \right)^{4.24} \right], \quad (15)$$

$$F_b(\theta_c) = 1 + A_i \left[4.5967 \left(\frac{\theta_c}{\pi} \right)^{1.5} + 2.6422 \left(\frac{\theta_c}{\pi} \right)^{4.24} \right]$$

여기서 A_i 는 다음과 같다.

$$A_i = \left(0.125 \frac{R}{t} - 0.25 \right)^{0.25} \quad \text{for } 5 \leq \frac{R}{t} \leq 10, \quad (16)$$

$$A_i = \left(0.4 \frac{R}{t} - 3.0 \right)^{0.25} \quad \text{for } 10 \leq \frac{R}{t} \leq 20$$

따라서, 식 (14)~(16)을 식 (13)에 대입하면 유연행렬 C (6×6)를 얻을 수 있으며, 해석에 필요한 스프링 상수는 제 1 파괴모드에 해당하는 항만을 고려한 유연행렬의 역수를 취함으로써 구할 수 있다. 즉, $K_R = C^{-1}$ 이다. 또, 크랙위치 ($x = x_c$)에서 다음 4개의 연속조건을 만족해야한다.

$$\begin{aligned} \phi_{i1}(x) &= \phi_{i2}(x), & \frac{d^2 \phi_{i1}(x)}{dx^2} &= \frac{d^2 \phi_{i2}(x)}{dx^2}, \\ \frac{d^3 \phi_{i1}(x)}{dx^3} &= \frac{d^3 \phi_{i2}(x)}{dx^3}, & & \\ \varphi_{i2}(x) - \varphi_{i1}(x) &= \frac{EI}{K_R} \frac{d^2 \phi_{i2}(x)}{dx^2} \end{aligned} \quad (17)$$

2.4 계의 운동방정식

계의 운동방정식은 식 (4) ~ 식 (10)의 에너지 식을 Lagrange 방정식에 대입하여 구할 수 있으며, 무차원화된 계의 운동방정식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \phi_{\ddot{v}_i}^2(\xi) d\xi + M_m \phi_{\ddot{v}_i}^2(\bar{x}_m) + M_f \int_0^{\xi_i} \phi_{\ddot{v}_i}^2(\bar{x}_\rho) d\xi_j \right\} \ddot{w}_i(\tau) \right. \\ & + \sum_{j=1}^2 \left\{ M_m \frac{d}{d\tau} [\phi_{\ddot{v}_i}^2(\bar{x}_m)] + M_f \int_0^{\xi_i} \frac{d}{d\tau} [\phi_{\ddot{v}_i}^2(\bar{x}_\rho)] d\xi_j \right\} \dot{w}_i(\tau) \\ & + \sum_{j=1}^2 \left[Q \int_0^{\xi_i} \{ \phi'_{\ddot{v}_i}(\xi) \}^2 d\xi - U^2 \int_0^{\xi_i} \{ \phi'_{\ddot{v}_i}(\bar{\xi}_\rho) \}^2 d\xi_j \right. \\ & + \beta \left\{ \frac{d}{d\tau} \{ \phi'_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_m) \} \phi_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_m) + \phi'_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_m) \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_m) \} \right\} \\ & - \gamma \phi_{\ddot{v}_i}^{\prime 2}(\bar{x}_m) + \sqrt{M_f} U \left\{ \int_0^{\xi_i} \frac{d}{d\tau} \{ \phi'_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_\rho) \} \phi_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_\rho) d\xi_j \right. \\ & + \left. \int_0^{\xi_i} \phi'_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_\rho) \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{\ddot{v}_i}(\bar{x}_\rho) \} d\xi_j \right\} \\ & + K_R \{ \phi'_{\ddot{v}_i}(\xi_2 = 0) - \phi'_{\ddot{v}_i}(\xi_1 = \xi_c) \}^2 w_i(\tau) \\ & \left. - \left\{ QL \sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \phi'_{\ddot{v}_i}(\xi) \phi_{\ddot{v}_i}(\xi) d\xi \right\} D_i(\tau) \right] = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \varphi_{ij}^2(\xi) d\xi \right\} D_i(\tau) \right. \\
& + \sum_{j=1}^2 \left\{ T \int_0^{\xi_i} (\varphi_{ij}(\xi))^2 d\xi + QT \int_0^{\xi_i} (\varphi_{ij}(\xi))^2 d\xi \right\} D_i(\tau) \\
& - \left. \left\{ \frac{Q}{L} \sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \phi_{ij}(\xi) \varphi_{ij}(\xi) d\xi \right\} w_i(\tau) \right] \\
& = 0
\end{aligned} \quad (19)$$

여기서 (\cdot) 는 무차원화된 시간 τ 에 대한 미분을 나타내고, (\prime) 는 무차원 변위 ξ 에 대한 미분을 표현한 것이다.

식 (18), (19)의 무차원 운동방정식에 사용한 무차원 매개 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
\xi &= \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \xi_c = \frac{x_c}{L}, \\
\xi_j &= \frac{x_j}{L} \quad (j=1,2), \quad \beta = \frac{m_m L}{\sqrt{mEI}} \bar{v}, \quad w = \frac{a}{L}, \\
D &= \frac{d}{L}, \quad \gamma = \frac{m_m L^3}{EI} \bar{v}^2, \quad M_m = \frac{m_m}{mL}, \\
M_f &= \frac{m_f}{m}, \quad U = uL \sqrt{\frac{m}{EI}}, \quad K_R = \frac{K_R L}{EI}, \\
\bar{x}_j &= uL \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau, \quad x_m = \bar{v} L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau, \\
Q &= \frac{xGA L^2}{EI}, \quad T = \frac{mL^2}{\rho I}
\end{aligned} \quad (20)$$

여기서 \bar{v} 는 v/L 이다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

이 연구에서는 이론해석에서 유도된 무차원 운동방정식을 이용하여 크랙이 존재하는 단순지지 파이프에 미치는 유동 유체의 영향과 크랙의 크기 및 이동질량의 속도에 따른 계의 진동특성을 수치해석을 통해 비교, 고찰하였다. 수치해석은 Matlab(6.1)에서 4차의 Runge-Kutta 방법으로 수행하였으며, 수치해석 예제에 사용한 파라미터는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of the cracked pipe

| Property | Data |
|------------------------------|---|
| Total length of beam (L) | 1 (m) |
| Out-radius of beam (R_o) | 0.1 (m) |
| Out-radius of beam (R_i) | 0.085 (m) |
| Young's modulus (E) | 2.08×10^{11} (N/m ²) |
| Density | 7860 (kg/m ³) |
| Poisson ratio (ν) | 0.3 |
| Moving mass (M_m) | 0.3 |

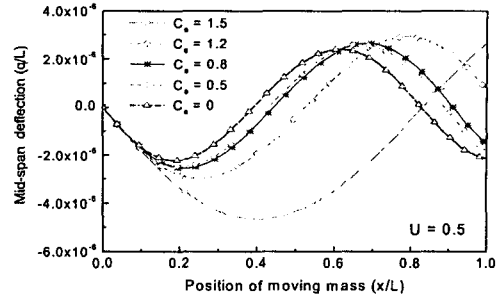


Fig. 3 Mid-span deflection of a cracked pipe conveying fluid with the moving mass ($v=1$ m/s)

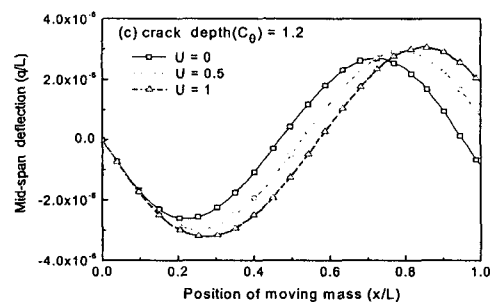
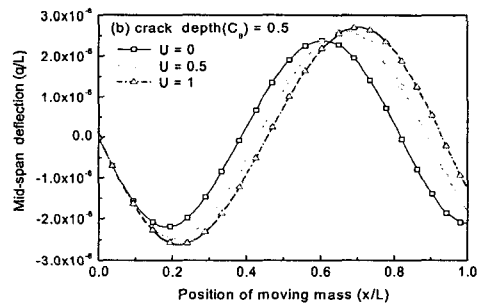
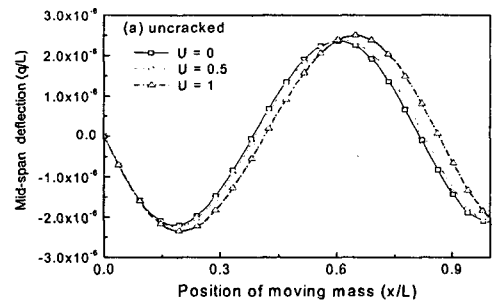


Fig. 4 Mid-span deflection of a cracked pipe according to velocity of fluid : $v=1$ m/s, $\xi_c=0.4$

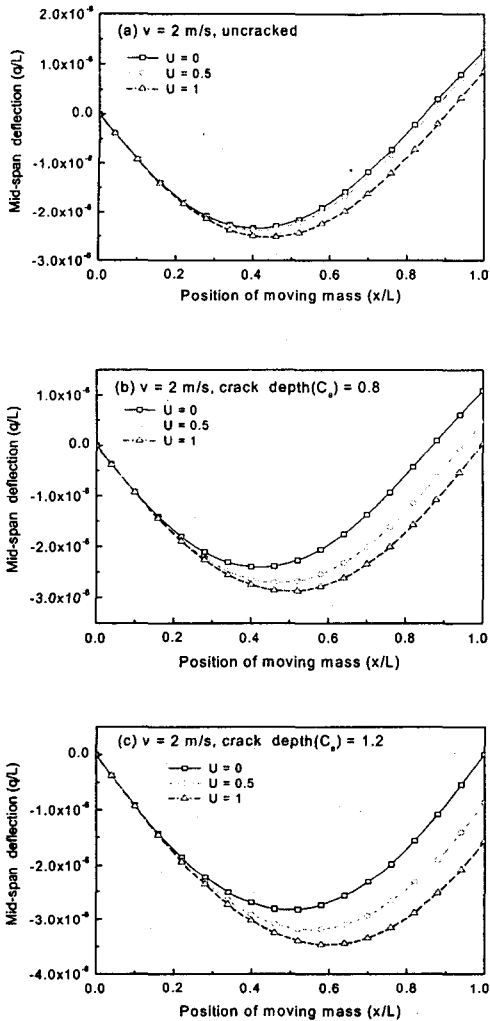


Fig. 5 Mid-span deflection of a cracked pipe according to velocity of fluid : $v = 2$ m/s, $\xi_c = 0.4$

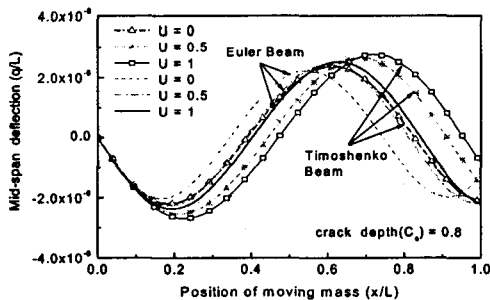


Fig. 6 Comparison between the mid-span deflection of Euler-Bernoulli beam and Timoshenko beam

Fig. 3 은 이동질량의 속도가 1 m/s, 유체의 속도가 0.5로 일정한 경우에 크랙의 크기에 따른 파이프의 굽힘변위를 도시한 것이다. 여기서 크랙의 크기 C_c 는 $C_c = \frac{\theta_c}{\pi}$ 이고, 크랙의 위치(ξ_c)는 0.4로 하였다. 전반적으로 크랙의 크기와 단순지지 파이프의 굽힘변위는 서로 비례적이며, 크랙의 크기가 증가할수록 최대 굽힘변위가 나타나는 이동질량의 위치가 보의 후반부로 이동되어짐을 알 수 있다. 크랙의 크기가 1.2일 때에 비해 크랙의 크기가 1.5인 경우에 파이프의 굽힘변위는 약 35.5%정도 급격히 굽힘변위가 증가하였다.

Fig. 4는 이동질량의 속도가 1 m/s인 경우 크랙의 깊이에 따른 유체 속도의 영향을 표현한 것이다. Fig. 4(a)의 크랙이 존재하지 않는 경우에 유체가 없는 경우에 비해 유속이 0.5일 때 약 1.2%, 유속이 1일 때 약 5.2%정도 파이프 굽힘 변위가 증가하였으며, Fig. 4(b)의 크랙 크기가 0.5일 때는 유체가 없는 경우에 비해 유속이 0.5, 1인 경우 약 8.4%, 11.3%정도 굽힘변위가 증가하였음을 알 수 있다. 즉, 크랙의 크기가 클수록 유체가 파이프의 굽힘변위에 미치는 영향이 더 크게 작용함을 알 수 있다.

Fig. 5는 이동질량의 속도가 2 m/s인 경우 크랙의 깊이에 따른 유체 속도의 영향을 나타낸 것이다. Fig. 4에서와 마찬가지로 크랙의 크기가 클수록 파이프의 변위에 미치는 유체의 영향은 더 크게 나타났으나, 크랙의 크기가 0.8인 Fig. 5(b)에서 유체가 없는 경우와 유체의 속도가 0.5, 1인 경우에 비해 약 11.5%, 16.7%정도 파이프 변위가 증가하였으며, 크랙의 크기가 1.2인 Fig. 5(c)에서는 약 11.8%, 18.7%로 변위의 증가량이 유사하게 나타났다.

Fig. 6은 이동질량의 속도가 1 m/s, 크랙의 크기가 0.8인 경우 오일러-베르누이 보와 티모센코 보의 굽힘변위를 유속의 변화에 따라 서로 비교한 것이다. 오일러-베르누이 보의 굽힘변위에 비해 티모센코 보의 변위가 전반적으로 더 크게 나타났다.

4. 결론

이동질량과 유동유체를 가지는 파이프 구조물에 크랙 형태의 결함이 존재할 때 그 시스템의 진동특성에 미치는 유속과 이동질량의 영향에 대하여 수치해석 하였다. 이론에서 크랙에 의해 부가되는 변형에너지는 유연행렬을 구하여 전체계에 적용하였으며, 티모센코 보 이론을 적용하였다. 연구 결과를 요약하면, 이 연구의 수치해석 예제에 사용한 파라미터 값에 대하여 유속이 일정한 경우 크랙의 크기와 파이프의 굽힘변위는 서로 비례적이며, 크랙의 크기가 증가할수록 최대 굽힘변위를 나타내는 이동질량의 위치가 보의 후반부로 이동되어진다. 또, 크랙의 크기가 클수록 유체가 파이프의 굽힘변위에 미치는 영향이 전반적으로 더 크게 나타났으며, 이동질량의 속도가 빠를수록 파이프의 굽힘변위에 미치

는 유속의 영향이 더 작게 나타난다.

이러한 연구결과를 바탕으로 유동유체를 갖는 보 형태 구조물의 안전진단 및 평가에 활용되어질 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Nikpour, K., 1990, "Buckling of Cracked Composite Columns," *Int. Journal of Solids and Structures*, Vol. 26, No. 12, pp. 1371~1386.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Bamnios, 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.
- (5) 윤한익, 최창수, 손인수, 2003, "크랙을 가진 유체유동 단순지지 파이프의 동특성 해석," *한국소음진동공학회의논문집*, 제 13 권, 제 7 호, pp. 562~569.
- (6) 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.
- (7) Tsai, T. C. and Wang, Y. Z., 1997, "The Vibration of a Multicracked Rotor," *Int. Journal of Mech. Sci.* Vol. 39, No. 9, pp. 1037~1053.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Viola, E., Federici, L. and Nobile, L., 2001, "Detection of Crack Location Using Cracked Beam Element Method for Structural Analysis," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 36, pp. 23~35.
- (11) 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.
- (12) X. Q. Zhu and S. S. Law, 1999, "Moving Forces Identification on a Multi-Span Continuous Bridge," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 228, No. 2, pp. 377~396.
- (13) Kgor A. Karnovsky and Olga I. Lebed, 2001, *Formulas for Structural Dynamics*, McGraw-Hill, Inc.
- (14) D. Liu, H. Gurgenci and M. Veidt, 2003, "Crack Detection in Hollow Section Structures Through Coupled Response Measurements," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, pp. 17~29.