

크랙과 이동질량을 가진 유체유동 외팔 파이프의 동특성에 관한 연구(I) - 진폭특성을 중심으로 -

A Study on Dynamic Behavior of Cantilever Pipe Conveying Fluid with Crack and Moving Mass (I) - Focused on the Amplitude Characteristics -

윤한익* · 손인수*
Han-Ik Yoon and In-Soo Son

(2004년 8월 2일 접수 : 2004년 11월 25일 심사완료)

Key Words : Moving Mass(이동질량), Open Crack(개구형 크랙), Flexibility Matrix(유연행렬), Cantilever Pipe Conveying Fluid(유체유동 외팔 파이프), Dynamic Behavior(동특성)

ABSTRACT

In this paper a dynamic behavior of a cracked cantilever pipe conveying fluid with the moving mass is presented. It has the results focused on the response characteristics. Based on the Euler-Bernouli beam theory, the equation of motion can be constructed by using the Lagrange's equation. The cracked section is represented by a local flexibility matrix connecting two undamaged beam segments. The crack is assumed to be in the first mode of fracture and to be always opened during the vibrations. When the fluid velocity is constant, the influences of the crack severity, the position of the crack, the moving mass and its velocity, and the coupling of these factors on the tip-displacement of the cantilever pipe are depicted.

1. 서 론

파이프 속을 흐르는 유체는 파이프의 진동을 유발하며, 파이프의 동적특성에 큰 영향을 미친다.⁽¹⁾ 또, 크랙과 같은 결함을 갖는 구조물에 어떤 하중이나 외력이 작용되면 크랙을 기점으로 해서 그 이상으로 힘이 증가하지 않고 급격히 균열이 전파되어 파괴된다. 이처럼 크랙과 유동유체는 파이프 구조물의 불안정 및 파괴의 주요 원인이 되며, 따라서 유동유체를 갖는 파이프에 크랙이 존재하는 구조물은 이러한 두 가지 불안정 요소를 모두 포함하고 있으므로 이들의 연

성관계에 의한 시스템의 동적특성을 파악하는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 구조물에 손상을 주지 않고 결함을 탐지해 낼 수 있는 비파괴적인 방법의 하나로 구조물이나 시스템의 고유진동특성 변화를 측정하여 크랙의 존재 유무, 위치 및 크기를 탐지할 수 있다. 하지만 유동유체의 영향을 고려하지 않는다면 정확한 결과를 얻기 어렵다. 또한 Suzuki⁽²⁾는 단순지지보가 일정가속도의 이동하중을 받는 경우 그 응답을 에너지법을 이용하여 해석하였으며, 그 결과 이동하중은 보의 동적특성에 큰 영향을 미친다는 것을 알게되었다. 따라서 이동질량과 유동유체를 갖는 보형태 구조물에 크랙의 존재를 사전에 감지하여 위험을 예방하고자 하는 경우에 구조물의 동적특성에 관계하는 구조물의 결함, 유동유체, 그리고 이동질량의 연성관계의 연구는 필수적이라 할 수 있다.

Langthjem⁽³⁾ 등은 두 개의 외팔 파이프 시스템에

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

서 내부 유속이 서로 다른 경우 이 시스템의 안정성 해석을 수행하였으며, 파이프에 내부 유동유체가 흐르는 경우 부가질량의 위치와 크기변화에 따른 계의 동적 안정성을 수치해석과 실험을 통하여 연구하였으며, 외란에 의한 파이프의 진동을 능동제어하는 기술을 실험을 통하여 제시하였다.⁽⁴⁾ 또, Yoon⁽⁵⁾ 등은 이동질량을 가진 유체유동 외팔 파이프의 동적특성에 대한 연구결과를 발표하였다. 최근, 보 형태의 구조물의 동특성에 미치는 크랙의 영향에 대하여 많은 연구⁽⁶⁻⁹⁾들이 이어지고 있으며, Tsai⁽¹⁰⁾ 등은 다중크랙을 가지는 로터의 진동에 대한 연구를 수행하였다. 또, Mahmoud⁽¹¹⁾ 등은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 집중질량을 가진 크랙이 있는 단순보의 동적응답을 전달행렬법으로 해석하였으며, 최근 오일러-베르누이 보와 티모셴코 보 이론을 적용하여 크랙과 이동질량을 가진 유체유동 단순지지 파이프의 동적특성에 대한 수치해석적 연구도 발표되어 지고 있다.^(9, 12) 위의 연구결과들은 대부분 계의 고유진동수에 미치는 크랙의 영향에 대한 해석이 대부분이며, 파이프의 동적응답에 대한 연구결과는 드문 실정이다. 또한 외팔 파이프의 응답특성에 미치는 이동질량, 유동유체 그리고 크랙의 영향에 대하여 포괄적으로 연구하지는 아니 하였다.

이 연구에서는 크랙과 이동질량, 그리고 유동유체가 외팔 파이프의 동적응답에 미치는 영향에 대하여 수치해석 하였다. 즉, 이 연구에서 고려한 시스템은 이동질량과 유동유체를 갖는 외팔 파이프가 개구형 크랙(open crack)을 가지는 시스템으로써, 이동질량을 갖는 외팔 파이프의 끝단변위에 미치는 유속, 이동질량, 그리고 크랙의 영향에 관하여 연구하였다.

2. 시스템 모델링

Fig. 1은 크랙과 유동유체를 가진 외팔 파이프 위를 이동질량이 일정한 속도로 이동하는 시스템을 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 속도, x_c 는 크랙의 위치이며, F_f 는 유동유체에 의해 파이프

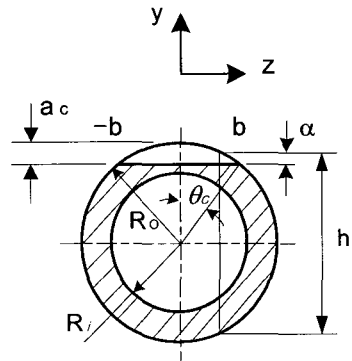


Fig. 2 Cross section of a cracked section

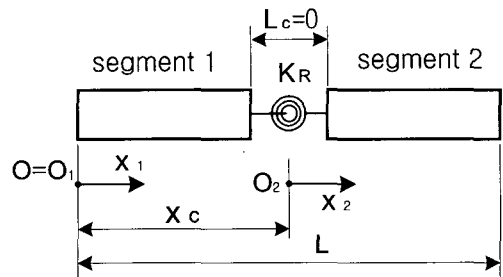


Fig. 3 Modeling of a cracked element

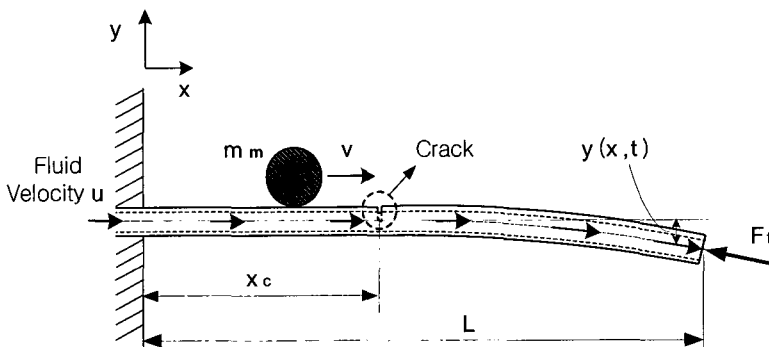


Fig. 1 Geometry of a cracked cantilever pipe conveying fluid with a moving mass

를 표현하고 있다. 또, θ_c 는 전체 크랙의 반각(half-angle)이다. Fig. 3에 표현한 것처럼 외팔 파이프에서 크랙위치를 기준으로 두 부분으로 분리하여 모델링 하였으며, 크랙위치에서는 크랙의 영향에 의한 파괴역학적 변수를 회전스프링 상수(K_R)로 변환하여 수치해석에 이용하였다.

2.1 외팔 파이프의 에너지 식

외팔 파이프의 횡변위 $y(x, t)$ 는 다음과 같이 가정할 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 모드의 수를 나타낸다. 또, 외팔 보의 고유함수 $\phi_i(x)$ 는 Fig. 3에서와 같이 크랙이 존재하는 위치(x_c)를 기준으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

I) segment 1 : $0 \leq x < x_c$

$$\begin{aligned} \phi_{i1}(x) = & A_1 \cos(\lambda_i x) + A_2 \sin(\lambda_i x) \\ & + A_3 \cosh(\lambda_i x) + A_4 \sinh(\lambda_i x) \end{aligned} \quad (2-1)$$

II) segment 2 : $x_c \leq x \leq L$

$$\begin{aligned} \phi_{i2}(x) = & A_5 \cos(\lambda_i x) + A_6 \sin(\lambda_i x) \\ & + A_7 \cosh(\lambda_i x) + A_8 \sinh(\lambda_i x) \end{aligned} \quad (2-2)$$

여기서 λ_i 는 식 (3)의 외팔 파이프의 진동수 방정식에서 구할 수 있다.

$$\cos(\lambda_i L) \cosh(\lambda_i L) + 1 = 0 \quad (3)$$

식 (2)에서 계수 $A_1 \sim A_8$ 은 다음의 외팔 파이프의 경계조건 및 크랙 위치에서의 연속조건에 대입하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{i1}(0) = 0, \quad \frac{d\phi_{i1}(0)}{dx} = 0, \\ \frac{d^2\phi_{i2}(L)}{dx^2} = 0, \quad \frac{d^3\phi_{i2}(L)}{dx^3} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi_{i1}(x_c) = \phi_{i2}(x_c), \quad \frac{d^2\phi_{i1}(x_c)}{dx^2} = \frac{d^2\phi_{i2}(x_c)}{dx^2}, \\ \frac{d^3\phi_{i1}(x_c)}{dx^3} = \frac{d^3\phi_{i2}(x_c)}{dx^3}, \end{aligned}$$

$$\frac{d\phi_{i2}(x_c)}{dx} - \frac{d\phi_{i1}(x_c)}{dx} = \frac{EI}{K_R} \frac{d^2\phi_{i2}(x_c)}{dx^2} \quad (5)$$

따라서, Fig. 1에서 보인 계를 구성하는 외팔 파이프, 이동질량, 그리고 유동유체의 에너지 식을 구하면 각각 다음과 같다.^(5, 9)

$$\begin{aligned} V_p = & \frac{1}{2} EI \sum_{i=1}^{\mu} \left[\int_0^{x_c} \left\{ \frac{d^2\phi_{i1}(x) q_i(t)}{dx^2} \right\}^2 dx \right. \\ & \left. + \int_{x_c}^L \left\{ \frac{d^2\phi_{i2}(x) q_i(t)}{dx^2} \right\}^2 dx \right] + \frac{1}{2} K_R (\Delta y'_c)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_p = & \frac{1}{2} m \sum_{i=1}^{\mu} \left[\int_0^{x_c} \{ \phi_{i1}(x) \dot{q}_i(t) \}^2 dx \right. \\ & \left. + \int_{x_c}^L \{ \phi_{i2}(x) \dot{q}_i(t) \}^2 dx \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T_m = & \frac{1}{2} m_m \sum_{i=1}^{\mu} \left[\left\{ v q_i(t) \frac{\phi_{ij}(x_m)}{dx} \right\}^2 \right. \\ & + 2 v q_i(t) \dot{q}_i(t) \phi_{ij}(x_m) \left\{ \frac{\phi_{ij}(x_m)}{dx} \right\} \\ & \left. + \dot{q}_i^2(t) \phi_{ij}^2(x_m) \right] + \frac{1}{2} m_m v^2 \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} T_f = & \frac{1}{2} m_f \sum_{i=1}^{\mu} \left[\int_0^{x_c} \{ u^2 \right. \\ & + 2 u \phi_{i1}(x_f) \phi_{i1}'(x_f) q_i(t) \dot{q}_i(t) \\ & + \{ \phi_{i1}(x_f) \dot{q}_i(t) \}^2 \} dx_f \\ & + \int_{x_c}^L \{ u^2 + 2 u \phi_{i2}(x_f) \phi_{i2}'(x_f) q_i(t) \dot{q}_i(t) \\ & + \{ \phi_{i2}(x_f) \dot{q}_i(t) \}^2 \} dx_f \\ & \left. (x_f = ut, \quad 0 \leq x_f \leq L) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 V_p , T_p , T_m , 그리고 T_f 는 각각 외팔 파이프의 포텐셜 및 운동 에너지, 이동질량의 운동에너지, 그리고 유동유체의 운동에너지를 나타내며, m_f 는 유체의 단위길이당 질량이다. 또, K_R 은 크랙으로 인하여 부가되는 스프링상수를 의미하며, E 는 Young 계수이다. 식 (8)에서 x_m 은 이동질량의 수평변위로 다음과 같다.

$$x_m = f(t) = \begin{cases} \int_0^t v dt & (0 \leq x_m \leq L), \\ 0 & (x_m > L) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 집중접선종동력에 의한 일량

유체유동의 분사력에 의하여 파이프에 작용되는 힘은 $x = L$ 인 끝단에 작용하는 집중 접선 종동력이 된다. 이러한 비보존적인 접선 종동력에 의한 일은 그 보존력성분에 의한 일과 비보존력 성분에 의한 일로 구분되며 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_c = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left[m_j u^2 \int_0^{x_c} \{ \phi'_{1i}(x_j) q_i(t) \}^2 dx_j + m_j u^2 \int_{x_c}^L \{ \phi'_{2i}(x_j) q_i(t) \}^2 dx_j \right] \quad (11)$$

$$\delta W_{nc} = - \sum_{i=1}^n m_i u^2 \phi'_{2i}(L) q_i(t) \phi_{2i}(L) \delta q_i(t) \quad (12)$$

2.3 크랙에 의한 탄성 변형에너지

같은 하중이 작용하는 구조물에서도 크랙이 존재하는 경우에 구조물의 자체 탄성 변형에너지 외에 크랙에 의한 변형에너지가 존재하고 이 부가되는 에너지만큼 추가적인 변형이 더 발생하게 된다. Castigliano의 정리에 의하여 크랙에 의해서 부가되는 변위와 크랙 위치에서의 유연행렬을 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_k = \frac{\partial}{\partial P_k} \int_b^a \int_0^{a_c} J(a) da dz \quad (13)$$

$$C_{ki} = \frac{\partial u_k}{\partial P_j} = \frac{\partial^2}{\partial P_k \partial P_j} \left[\int_{-b}^b \int_0^{a_c} J(a) da dz \right] \quad (14)$$

여기서 P_k 는 k 방향에서의 힘이고, J 는 변형률 에너지 밀도함수(strain energy density function)로써 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$J(a) = \frac{1}{E^*} (K_{IM})^2 \quad (15)$$

여기서 E^* 은 평면변형에 대하여 $E^* = E / (1 - \nu_p^2)$ 로 표현되며, K_{IM} 과 ν_p 는 각각 모멘트에 의한 응력 집중계수와 Poisson의 비를 나타낸다. 중공축 원형단면인 경우 응력집중계수는 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$K_{IM} = \frac{M}{\pi R^2 t_p} \sqrt{\pi R \theta_c} F_b(\theta_c) \quad (16)$$

여기서 M 은 굽힘 모멘트이고, t_p 는 파이프의 두께, R 은 $(R_o + R_i)/2$ 를 의미한다. R_o 와 R_i 는 각각 파이프의 외경과 내경을 나타낸다. 또, θ_c 는 전체 크

랙의 반각(half-angle)이며, $F_b(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$F_b(\theta_c) = 1 + A_t \left[4.5967 \left(\frac{\theta_c}{\pi} \right)^{1.5} + 2.6422 \left(\frac{\theta_c}{\pi} \right)^{4.24} \right] \quad (17)$$

여기서 A_t 는 다음과 같다.

$$A_t = \begin{cases} (0.125 \frac{R}{t_p} - 0.25)^{0.25} & \text{for } 5 \leq \frac{R}{t_p} \leq 10, \\ (0.4 \frac{R}{t_p} - 3.0)^{0.25} & \text{for } 10 \leq \frac{R}{t_p} \leq 20 \end{cases} \quad (18)$$

따라서, 식 (15)~(18)을 식 (14)에 대입하면 유연행렬을 얻을 수 있으며, 해석에 필요한 회전 스프링 상수는 영향이 큰 제 1 파괴모드에 해당하는 항만을 고려하였다.

2.4 계의 운동방정식

계의 운동방정식은 앞에서 구한 각 에너지 식을 Lagrange 방정식에 대입하여 구할 수 있으며 구해진 계의 운동방정식을 무차원화하기 위하여 무차원 매개변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{x}{L}, \quad \xi_c = \frac{x_c}{L}, \quad d = \frac{q}{L}, \quad M = \frac{m_f}{m}, \\ V &= v \sqrt{\frac{m_m L}{EI}}, \quad \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \xi_j = \frac{x_j}{L}, \\ K_R^* &= \frac{K_R L}{EI}, \quad U = uL \sqrt{\frac{m_f}{EI}}, \quad M_m = \frac{m_m}{mL}, \\ \xi_m &= vL \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau, \quad \xi_f = uL \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau, \quad \theta^* = \frac{\theta_c}{\pi} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 τ 는 무차원 시간을 나타낸다. 식 (19)의 무차원 매개변수를 이용하여 계의 무차원화된 운동방정식을 행렬형태로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{0} \quad (20)$$

여기서 (\cdot) 는 무차원화된 시간 τ 에 대한 미분을 나타내며, 식 (20)의 각 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \phi_{2ij}^2(\xi) d\xi + \int_0^{\xi_c} M \phi_{2i}^2(\xi_f) d\xi_f + \int_{\xi_c}^1 M \phi_{2i}^2(\xi_f) d\xi_f + M_m \phi_{2i}^2(\xi_m) \right\} \quad (21)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \left[M \left\{ \int_0^{\xi_i} \frac{d}{dt} \{ \phi_{ij}^2(\xi_f) \} + \int_{\xi_i}^1 \frac{d}{dt} \{ \phi_{i2}^2(\xi_f) \} \right\} d\xi_f + M_m \frac{d}{dt} \{ \phi_{ij}^2(\xi_m) \} \right] \quad (22)$$

$$K = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \{ \phi_{ij}''(\xi) \}^2 d\xi - V^2 \{ \phi_{ij}'(\xi_m) \}^2 + \sqrt{M_m} V \left\{ \frac{d}{dt} \{ \phi_{ij}'(\xi_m) \} \phi_{ij}(\xi_m) + \frac{d}{dt} \{ \phi_{ij}(\xi_m) \} \phi_{ij}'(\xi_m) \right\} + \sqrt{M} U \sum_{j=1}^2 \left[\int_0^{\xi_i} \left\{ \frac{d}{dt} \{ \phi_{ij}'(\xi_f) \} \phi_{ij}(\xi_f) + \frac{d}{dt} \{ \phi_{ij}(\xi_f) \} \phi_{ij}'(\xi_f) \right\} d\xi_f + U^2 \phi_{i2}(1) \phi_{i2}(1) - U^2 \sum_{j=1}^2 \int_0^{\xi_i} \{ \phi_{ij}'(\xi_f) \}^2 d\xi_f + K_R \{ \{ \phi_{i2}(\xi_2=0) \} - \{ \phi_{i1}(\xi_1=\xi_c) \} \}^2 \right] \quad (23)$$

여기서 (')는 무차원 축방향 좌표 ξ 에 대한 미분을 표현한 것이며, j 는 크랙으로 인한 분할구간의 수이다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

이 연구에서는 이론해석에서 유도된 무차원 운동방정식을 이용하여 크랙이 존재하는 외팔 파이프에 미치는 유동유체의 영향과 크랙 및 이동질량의 속도에 따른 계의 진동특성을 수치해석하였다. 수치해석은 Matlab (v.6.1)에서 4차 Runge-Kutta 방법으로 수행하였으며, 수치해석 예제에 사용한 파라미터는 Table 1에 나타내었다. 유동유체를 갖는 파이프의 안정성에 관한 연구결과^(3, 4)는 많기 때문에 이 연구에서는 유체를 임계유속 내의 한 값 ($U=0.5$)으로 결정하여 이 값에 대하여 다른 파라미터의 변화를 중심으로 파

Table 1 Specifications of the cracked pipe

Property	Value
Length of pipe (L)	1 m
Outer radius of pipe (R_o)	0.025 m
Inner radius of pipe (R_i)	0.02 m
Young's modulus (E)	2.08×10^{11} N/m ²
Density	7860 kg/m ³
Velocity of fluid (U)	0.5
Poisson's ratio (ν_p)	0.3

이프의 동적응답을 수치해석 하였다. 또, 해석에 있어서 제 1차 모드의 횡변위가 제 2차 또는 그 이상의 상위 모드의 횡변위에 비하여 일반적으로 대단히 크기 때문에 이 연구에서는 제 1차 모드의 동적응답에 대해서 고찰하였다. 외팔 파이프의 해석은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였다.

Fig. 4는 이동질량의 속도가 1m/s, 무차원 유체의 속도 U 가 0.5로 일정한 경우에 크랙의 크기에 따른 외팔 파이프의 끝단 횡변위를 도시한 것이다. 가로축은 시간을 표현하고 있으며, 시간이 1초 일 때 이동질량이 파이프를 떠난다. 참고문헌 (5)의 연구결과와는 달리 이동질량이 파이프를 떠나면서 외팔 파이프의 끝단 횡변위에 영향을 주지 못하는 것은 Table 1에 보인 것과 같이 파이프의 재질을 강성이 큰 재료를 수치해석에 이용하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4에서 크랙의 크기 θ^* 는 $\theta^* = \theta_c / \pi$ 이고, 크랙의 위치(ξ_c)는 0.3으로 하였다. 전반적으로 크랙의 크기와 외팔 파이프의 끝단 횡변위는 서로 비례적이며, 크랙의 크기가 증가할수록 최대 횡변위가 나타나는 시기가 지연되어짐을 알 수 있다. 크랙이 없을 때보다 크랙이 0.1인 경우와 0.15인 경우에 각각 끝단 최대 횡변위는 약 1.82%정도, 4.31% 정도 끝단 횡변위가 증가하였다. 또, 크랙의 크기가 비교적 큰 0.2인 경우와 0.25인 경우에 끝단 최대 횡변위는 약 14.7%정도의 차이를 보인다.

Fig. 5는 유체의 속도가 0.5, 크랙의 위치가 0.3이고 크랙의 크기가 변하는 경우 외팔 파이프의 끝단

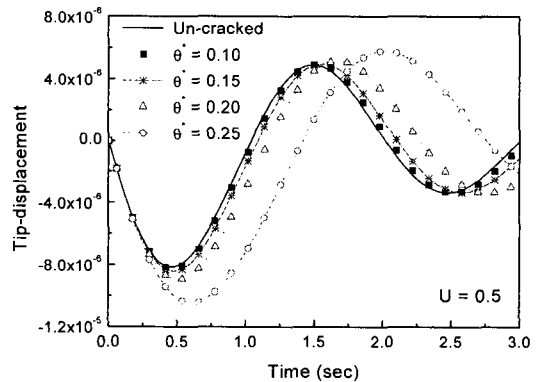
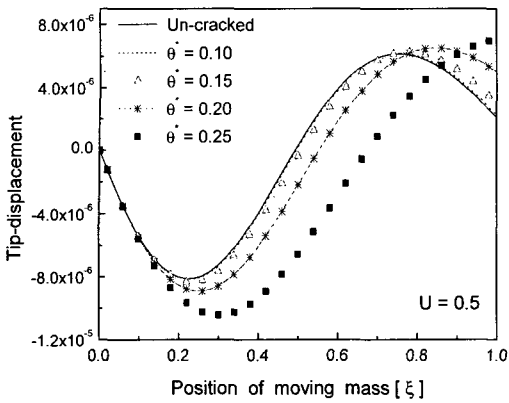
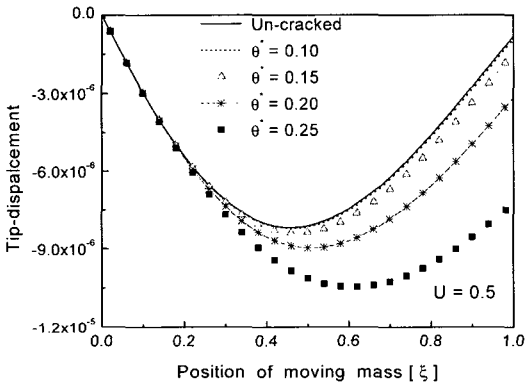


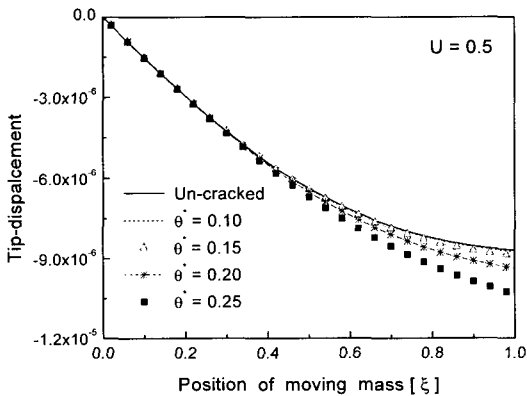
Fig. 4 Tip-displacement of a cantilever pipe conveying fluid with moving mass according to a crack severity ($v = 1$ m/s, $U = 0.5$, $M_m = 0.3$)



(a) $V=3.4E-3$ ($v=0.5$ m/s)



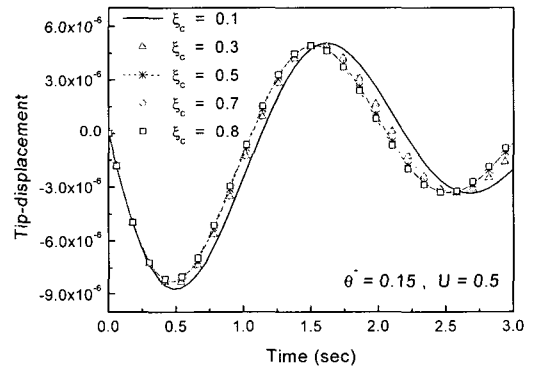
(b) $V=6.8E-3$ ($v=1$ m/s)



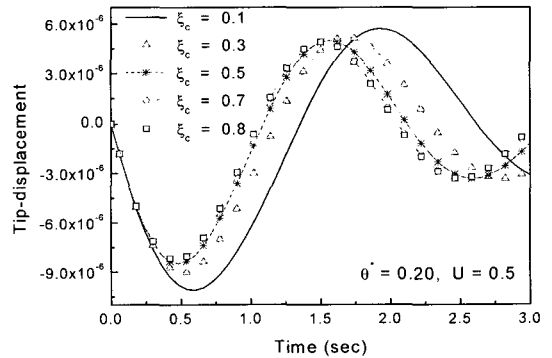
(c) $V=13.6E-3$ ($v=2$ m/s)

Fig. 5 Tip-displacement of cantilever pipe conveying fluid with a moving mass according to moving mass velocity ($U = 0.5$, $M_m = 0.3$, $\xi_c = 0.3$)

형변위를 이동질량의 속도에 따라 표현한 것이다. 여기서 가로축은 외팔 파이프 위를 이동하는 이동질량의 위치를 의미한다. Fig. 5(a)는 무차원 이동질량의 속도가 $3.4E-3$ (0.5 m/s) 인 경우이고, Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)는 이동질량의 무차원 속도가 각각 $6.8E-3$, $13.6E-3$ 일 때 크랙의 크기에 따른 외팔 파이프 끝단 형변위이다. Fig. 4 에서와 마찬가지로 이동질량의 속도와 관계없이 외팔 파이프의 끝단 형변위는 크랙의 크기와 서로 비례적이다. Fig. 5 (b)에서 크랙의 크기가 0.1 일 때와 0.2 인 경우 이동질량이 파이프 끝단에 위치할 때의 끝단 형변위는 약 71.2%의 큰 차이를 보이고 있으며, Fig. 5 (c)에서는 동일한 조건의 두 경우, 외팔 파이프의 끝단 형변위는 약 6.31%의 차이를 보인다. 즉, 이동질량이 파이프 위를 이동하는



(a) $\theta^* = 0.15$



(b) $\theta^* = 0.20$

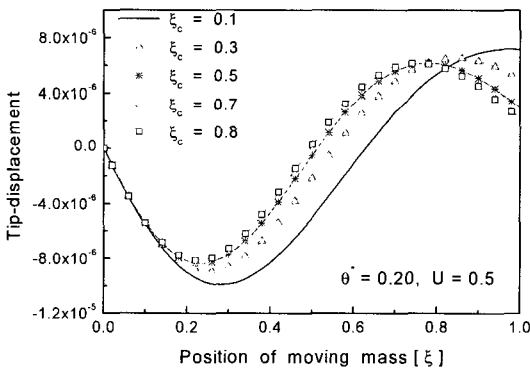
Fig. 6 Tip-displacement of a cracked cantilever pipe conveying fluid with a moving mass according to the crack position ($v=1$ m/s)

동안은 이동질량의 속도가 빠를수록 파이프 끝단 횡변위에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 또, 이동질량의 속도가 비교적 빠른 경우인 Fig. 5 (c)에서 이동질량이 외팔 파이프 위를 이동하는 동안에 최대 변위가 나타나지 않는다. Fig. 5(a), Fig. 5(b)의 결과를 미루어 보아 이동질량의 속도가 빠른 경우, 파이프의 끝단 최대 횡변위는 이동질량이 파이프 위를 떠난 후에 나타난다는 것을 예측할 수 있다. 이러한 결과는 참고문헌 (14)의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

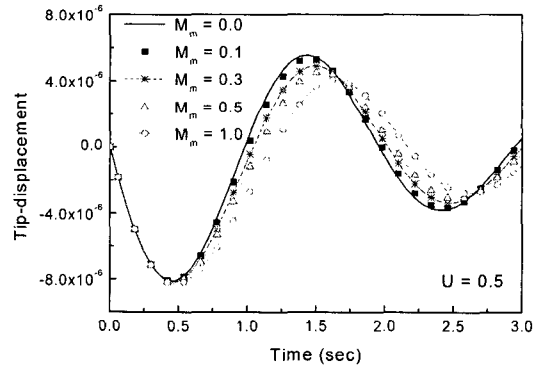
Fig. 6은 이동질량의 무차원 속도가 $6.8E-3$ 이고, 크랙의 크기가 0.15, 0.2인 경우 크랙의 위치 변화에 따른 외팔 파이프의 끝단 횡변위를 나타낸 것이다. 크랙의 크기와 이동질량이 일정한 경우 크랙이 존재하는 위치가 외팔 파이프의 앞부분에 존재하는 경우에 크랙이 파이프의 뒷부분에 존재할 때 보다 파이프

의 끝단 횡변위는 더 크게 나타난다. 크랙의 크기가 0.15인 경우 크랙의 위치가 파이프의 0.1인 위치에 존재하는 경우 크랙의 위치가 0.5인 경우에 비해 파이프 끝단 최대 횡변위는 약 1.92% 정도 증가한다. 또, 크랙의 크기가 0.2인 Fig. 6(b)의 경우 같은 조건에서 약 14.7% 정도 끝단 최대 횡변위가 증가함을 알 수 있다.

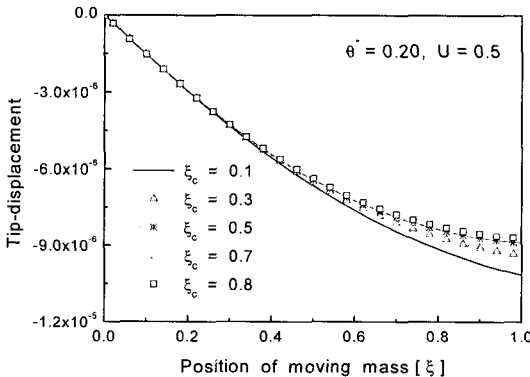
Fig. 7은 크랙의 크기가 0.2이고, 이동질량이 0.3인 경우 외팔 파이프의 끝단 횡변위를 이동질량의 속도에 따라 표현한 것이다. 유체의 속도는 0.5이며, 그래프의 가로축은 파이프 위를 지나는 이동질량의 위치를 나타내었다. Fig. 6의 결과와 마찬가지로 이동질량의 속도와 관계없이 크랙의 위치가 파이프의 앞부분에 있을 때가 크랙의 위치가 파이프의 뒷부분에 존재하는 경우에 비해서 파이프의 끝단 횡변위가 더 크



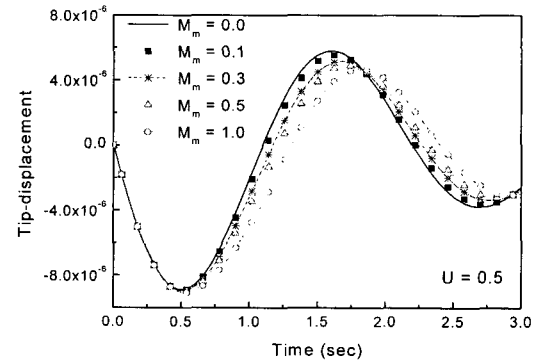
(a) $V=3.4E-3$ ($v=0.5$ m/s)



(a) $\theta^* = 0.0$



(b) $V=13.6E-3$ ($v=2$ m/s)



(b) $\theta^* = 0.15$

Fig. 7 Tip-displacement of a cracked cantilever pipe conveying fluid with a moving mass according to the moving mass velocity

Fig. 8 Tip-displacement of a cracked cantilever pipe conveying fluid according to a moving mass ($U = 0.5$, $V=6.8E-3$, $\xi_c = 0.3$)

게 나타난다. 또, 이동질량이 외팔 파이프 위를 이동하고 있는 동안, 이동질량의 속도가 빠를수록 파이프의 끝단 횡변위에 미치는 크랙의 위치 영향이 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 유속이 0.5이고, 이동질량의 무차원 속도가 $6.8E-3$ 인 경우 이동질량의 크기에 따른 외팔 파이프의 끝단 횡변위를 도시한 것이다. Fig. 8(a)는 크랙이 존재하지 않는 경우이고, Fig. 8(b)는 크랙의 크기가 0.15, 크랙이 존재하는 위치가 0.3인 경우의 그래프이다. 일반적으로 잘 알려진 바와 같이 크랙의 크기와 관계없이 이동질량의 크기와 파이프의 끝단 횡변위는 서로 반비례적이다. 크랙이 존재하는 Fig. 8(b)의 경우 크랙이 존재하지 않은 Fig. 8(a)에 비하여 단지 끝단 최대 횡변위의 크기만 전반적으로 약 4% 정도 증가하였을 뿐, 이동질량의 크기는 외팔 파이프의 동적응답에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

이동질량과 유동유체를 가지는 파이프 구조물에 크랙 형태의 결함이 존재할 때 그 시스템의 파이프의 응답특성에 미치는 이동질량 및 크랙의 영향에 대하여 수치해석 하였다. 계의 수학적 모델링에서 크랙에 의해 부가되는 변형에너지는 유연행렬을 구하여 전체 시스템에 적용하였으며, 크랙은 개구형 크랙으로 가정하였다.

연구결과를 요약하면, 이 연구의 수치해석 예제에 사용한 파라미터 값에 대하여 유속이 일정한 경우 이동질량의 존재에 관계없이 크랙의 크기와 외팔 파이프의 끝단 횡변위는 서로 비례적이며, 크랙의 크기가 증가할수록 최대 횡변위를 나타내는 이동질량의 위치가 파이프의 후반부로 이동되어진다. 크랙의 크기가 미소한 경우($\theta < 0.1$)에는 크랙이 존재하지 않는 경우와 비교해서 응답특성에 큰 변화가 없었다. 따라서 크랙의 크기가 작은 경우, 파이프의 횡변위 만으로는 크랙의 존재여부 및 결함진단을 수행하기가 어려울 것으로 판단된다. 하지만 크랙의 크기가 클수록 각 파라미터에 대한 외팔 파이프의 응답특성에 현저한 차이를 발견할 수 있다. 또, 이동질량의 크기증가는 단지 파이프의 끝단 횡변위를 감소시키며, 이동질량의 속도가 비교적 빠를 때 이동질량이 파이프 위를

떠난 후에 파이프의 끝단 최대 횡변위를 일으킨다. 따라서 이동질량의 속도가 클 때는 이동질량이 떠난 후 파이프의 동적응답 또한 고려하여야 한다.

참 고 문 헌

- (1) Benjamin, T. B., 1961, "Dynamics of a System of Articulated Pipes Conveying Fluid (I. Theory)," *Proceedings of the Royal Society (London), Series A, Vol. 261, pp. 457~486.*
- (2) Suzuki, S. I., 1977, "Dynamic Behaviour of a Finite Beam Subjected to Travelling Loads with Acceleration," *Journal of Sound and Vibration, Vol. 55, No. 1, pp. 65~70.*
- (3) Langthjem M. A. and Sugiyama, Y., 1999, "Vibration and Stability Analysis of Cantilevered Two-pipe Systems Conveying Different Fluids," *Journal of Fluids and Structures, Vol. 13, pp. 251~268.*
- (4) 류봉조, 정승호, 이종원, 2000, "유체유동에 의한 유연한 파이프의 불안정과 진동억제에 미치는 부가질량의 영향," *한국소음진동공학회논문집, 제 10권, 제 2호, pp. 280~290.*
- (5) 윤한익, 손인수, 2002, "이동질량을 가진 유체유동 외팔 파이프의 동특성," *한국소음진동공학회논문집, 제 12권, 제 7호, pp. 550~556.*
- (6) 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.*
- (7) 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.*
- (8) 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.*
- (9) 윤한익, 김영수, 손인수, 2003, "크랙을 가진 단순지지 보의 동특성에 미치는 이동질량의 영향," *한국소음진동공학회논문집, 제 13권, 제 7호, pp. 555~561.*

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

(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) 윤한익, 진종태, 손인수, 2003, "티모셴코 보 이론을 적용한 크랙을 가진 유체유동 파이프의 동특

성에 관한 연구," *한국소음진동공학회논문집*, 제 14 권, 제 3 호, pp. 236~243.

(13) 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.

(14) W. Weaver, Jr., P. Timoshenko and H. Young, 1990, *Vibration Problems in Engineering* (5th ed.), John Wiley & Sons, Inc.