

# 크랙과 이동질량을 가진 유체유동 단순지지 파이프의 동특성에 관한 연구

윤한익\* · 진종태\* · 손인수\*\*

(2003년 7월 3일 접수, 2004년 3월 5일 심사완료)

## A Study on Dynamic Behavior of Simply Supported Fluid Flow Pipe with Crack and Moving Mass

Han-Ik Yoon, Jong-Tae Jin and In-Soo Son

**Key Words:** Moving Mass(이동질량), Open Crack(개구형 크랙), Euler-Bernoulli Beam Theory (오일러-베르누이 보 이론), Conveying Fluid Pipe(송수관)

### Abstract

In this paper, studied about the effect of open crack and the moving mass on the dynamic behavior of simply supported pipe conveying fluid. The equation of motion is derived by using Lagrange's equation. The influences of the velocity of moving mass, the velocity of fluid flow and a crack have been studied on the dynamic behavior of a simply supported pipe system by numerical method. The crack section is represented by a local flexibility matrix connecting two undamaged beam segments. Therefore, the crack is modelled as a rotational spring. Totally, as the velocity of fluid flow is increased, the mid-span deflection of simply supported pipe conveying fluid is increased. The position of the crack is located in the middle point of the pipe, the mid-span deflection of simply supported pipe presents maximum deflection.

### 1. 서론

유체를 갖는 파이프 형태의 구조물에서 유체는 진동을 일으키는 주요 원인이 되며, 점성이 매우 작은 유체는 파이프의 끝단에 작용하는 집중종동력으로 작용하며 진동해석에 중요한 인자가 된다. 또, 구조손상의 하나인 크랙은 구조물의 진동특성과 안정성을 변화시켜 구조물의 불안정 및 파괴를 유발하는 주요 원인이 되며, 따라서 유동 유체를 갖는 파이프에 크랙이 존재하는 시스템은

이러한 불안정을 일으키는 두 요소를 모두 포함하고 있으므로 이들의 연성관계에 의한 시스템의 동적특성을 파악하는 것은 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

크랙과 종동력을 고려한 보에 대한 연구는 티모셴코 보 이론을 적용하여 크랙과 종동력이 보의 동적 안정성 및 동적응답에 미치는 영향에 대한 연구결과들<sup>(1,2)</sup>이 있으며, Liu<sup>(3)</sup> 등은 파이프 형태의 중공축에 크랙이 존재하는 경우 크랙의 크기에 따른 중공축의 동적특성을 연구하였다. 또, Mahmoud<sup>(4)</sup> 등은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 집중질량을 가진 크랙 단순지지 보의 동적응답을 전달행렬법을 이용하여 수치 해석하였다. Dimarogonas<sup>(5)</sup>는 회전축에 존재하는 크랙이 회전축의 진동특성에 미치는 영향에 대한 많은 연구자들의 연구결과들을 총괄적으로 정리하여 발표

\* 책임저자, 회원, 동의대학교 기계정보산업공학부

E-mail : hiyoon@dongeui.ac.kr

TEL : (051)890-1645 FAX : (051)890-2232

\* 부산정보대학 기계자동차계열

\*\* 동의대학교 대학원 기계공학과

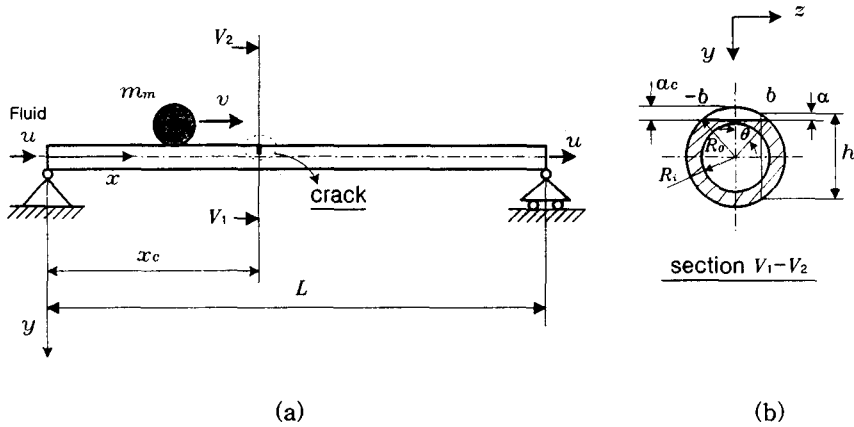


Fig. 1 Geometry of the cracked simply supported fluid flow pipe with the moving mass

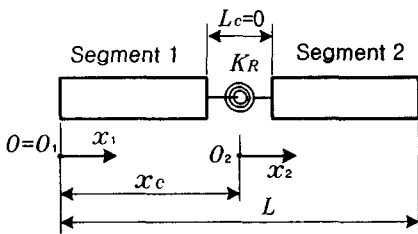


Fig. 2 Modeling of a cracked element

하였다. 또, 이동질량을 가지는 보의 동적응답에 대한 연구들<sup>(6,7)</sup>과 이동질량과 유체의 연성관계가 보 형태의 구조물의 동적특성에 미치는 영향에 대한 많은 연구들<sup>(8-10)</sup>이 활발히 진행되어 지고 있다.

이 연구에서는 산업현장 등에서 생산된 제품이 다음 공정으로 이동할 때 이용되는 컨베이어형 구조물에 크랙과 같은 결함이 존재하는 경우를 고려한 것이다. 즉, 이동질량에 의하여 이동질량을 지지하는 파이프가 가열되는 경우, 그 가열에 의하여 파이프가 팽창 또는 연화되어 변형을 일으키는 것을 방지하기 위하여 파이프 내부에 냉각수를 통과시키는 시스템을 고려하였다. 이동질량을 가지는 단순지지 유체유동 파이프에 비진전 개구형 크랙이 존재할 때 이동질량과 유체유체 및 크랙이 단순지지 파이프의 횡진동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 단순지지 파이프의 해석은 오일러-베르누이 보 이론을 적용하였다.

## 2. 시스템 모델링

Fig. 1은 크랙을 가진 단순지지 파이프 위를 이동질량이 일정한 속도로 이동하는 탄성계의 개략도를 나타내고 있다. 여기서  $m_m$ 은 이동질량,  $v$ 는 이동질량의 속도, 그리고  $L$ 은 단순지지 보의 전체 길이를 나타낸다. 또,  $a$ 는 크랙의 깊이를 의미하며  $a_c$ ,  $h$ , 그리고  $b$ 는 각각 크랙의 최대 깊이와 크랙이 존재하는 파이프 단면지름, 그리고 크랙의 길이를 표현하고 있다. Fig. 2는 크랙을 가지는 단순지지 파이프를 수학적 계산을 위하여 간단히 모델링 한 것이다. 여기서,  $x_c$ 는 크랙이 존재하는 위치를 나타낸다. 크랙이 존재하는 경우 크랙위치에서는 크랙의 영향에 의한 파괴역학적 변수를 구하여 보의 횡방향 진동에 영향을 미치는 등가의 회전 스프링 상수로 변환하여 수치해석에 이용하였다.

### 2.1 단순지지 파이프 및 이동질량의 에너지

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

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

여기서,  $q_i(t)$ 는 일반화 좌표,  $\mu$ 는 모드의 수

를 나타낸다. 또,  $\phi_i(x)$  는 단순지지 보의 횡방향 진동의 모드모양을 표현하고 있다. 따라서 크랙을 가진 단순지지 파이프의 포텐셜 에너지를 오일러-베르누이 보 이론을 적용하여 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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.

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

또, 단순지지 파이프의 운동에너지를 구하면 다음과 같다.

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

여기서  $m$  은 단순지지 파이프의 단위길이당 질량이다. 이동질량들은 단순지지 보와 분리되지 않고 접촉된 상태로 이동한다고 가정하였으며, 따라서 이동질량들의 연직방향 변위와 속도를 이용하여 이동질량의 운동에너지를 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$T_m = \frac{1}{2} m_m \sum_{i=1}^n \left[ \left\{ v q_i(t) \frac{\phi_{ij}(x_1)}{dx} \right\}^2 + 2 v q_i(t) \dot{q}_i(t) \phi_{ij}(x_1) \left\{ \frac{\phi_{ij}(x_1)}{dx} \right\} + \dot{q}_i^2(t) \phi_{ij}^2(x_1) \right] + \frac{1}{2} m_m v^2 \quad (5)$$

$$\text{where, } j = \begin{cases} 1 & (0 \leq x_1 \leq x_c), \\ 2 & (x_c < x_1 \leq L) \end{cases}$$

여기서  $x_1$  은 이동질량의 수평변위로 다음과 같다.

$$x_1 = f(t) = \begin{cases} \int_0^t v dt & (0 \leq x_1 \leq L), \\ 0 & (x_1 > L) \end{cases} \quad (6)$$

### 2.2 유체에 의한 에너지

파이프에 대한 유체의 상대속도가  $u$  이고, 유체의 절대속도에는 파이프의 운동이 포함되어야 한다. 유체의 속도를 구하여 유체유동의 운동에너지를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$T_f = \frac{1}{2} m_f \sum_{i=1}^n \left[ \int_0^{x_c} \{ u^2 + 2u\phi_{i1}(x_f) \dot{q}_i(t) + \{ \phi_{i1}(x_f) \dot{q}_i(t) \}^2 \} dx_f + \int_{x_c}^L \{ u^2 + 2u\phi_{i2}(x_f) \dot{q}_i(t) + \{ \phi_{i2}(x_f) \dot{q}_i(t) \}^2 \} dx_f \right] \quad (7)$$

$(x_f = ut, \quad 0 \leq x_f \leq L)$

여기서,  $m_f$  는 유체의 단위 길이당 질량이다.

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.

$$W_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \int_0^{x_c} \rho A u^2 \{ \phi_{i1}(x_f) q_i(t) \}^2 dx_f + \int_{x_c}^L \rho A u^2 \{ \phi_{i2}(x_f) q_i(t) \}^2 dx_f \right] \quad (8)$$

$$W_{nc} = - \sum_{i=1}^n \rho A u^2 \phi_{i2}(L) \phi_{i2}(L) q_i^2(t) = 0 \quad (9)$$

### 2.3 크랙에 의한 탄성 변형에너지

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

여 크랙에 의해서 부가되는 변위와 크랙 부분의 유연행렬을 구할 수 있다.<sup>(3)</sup> 또, 변형을 에너지 밀도함수(strain energy density function)는 다음과 같다.

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

여기서  $E^*$ 은 평면변형에 대하여  $E^* = E/(1-\nu^2)$ 로 표현되며,  $K_{IP}$ 는 전단력에 의한 응력집중계수,  $K_{IM}$ 은 모멘트에 의한 응력집중계수를 나타낸다. 실측 원형단면인 경우 식 (10)의 각 요소는 다음과 같다.

$$K_{IP} = \frac{V}{2\pi R t_p} \sqrt{\pi R \theta} F_t(\theta), \quad (11)$$

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

여기서  $V, M$ 은 각각 힘과 모멘트이고,  $t_p$ 는 파이프의 두께,  $R$ 은  $(R_o + R_i)/2$ 를 의미한다. 또,  $\theta$ 는 전체 크랙의 반각(half-angle)이며, 식 (11)의  $F_t(\theta)$ 와  $F_b(\theta)$ 는 각각 다음과 같다.

$$F_t(\theta) = 1 + A_t \left[ 5.3303 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{1.5} + 18.773 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{4.24} \right],$$

$$F_b(\theta) = 1 + A_t \left[ 4.5967 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{1.5} + 2.6422 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^{4.24} \right] \quad (12)$$

여기서  $A_t$ 는 다음과 같다.

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

$$A_t = \left( 0.4 \frac{R}{t_p} - 3.0 \right)^{0.25} \quad \text{for } 10 \leq \frac{R}{t_p} \leq 20 \quad (13)$$

여기서  $\zeta = \frac{\pi \alpha}{2h}$  이다. 따라서, 식 (10)~식 (13)을 이용하면 유연행렬 ( $6 \times 6$ )을 얻을 수 있으며, 해석에 필요한 회전 스프링 상수는 이 행렬의 역수를 취함으로써 구할 수 있다. 크랙위치에서 다음의 4가지 경계조건을 만족해야한다.

$$\begin{aligned} \phi_{i1}(x) &= \phi_{i2}(x), \quad \frac{d^2 \phi_{i1}(x)}{dx^2} = \frac{d^2 \phi_{i2}(x)}{dx^2}, \\ \frac{d^3 \phi_{i1}(x)}{dx^3} &= \frac{d^3 \phi_{i2}(x)}{dx^3}, \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\phi_{ij}(x) = \begin{cases} \phi_{i1}(x) & : 0 \leq x \leq x_c \\ \phi_{i2}(x) & : x_c \leq x \leq L \end{cases}$$

#### 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.

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \xi_j = \frac{x_j}{L} \quad (j=1,2),$$

$$\xi_c = \frac{x_c}{L}, \quad d = \frac{q}{L}, \quad \beta = \frac{m_m L}{\sqrt{mEI}} \bar{v},$$

$$\tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \gamma = \frac{m_m L^3}{EI} \bar{v}^2, \quad (15)$$

$$M_m = \frac{m_m}{mL}, \quad K_R^* = \frac{K_R L}{EI},$$

$$U = uL \sqrt{\frac{m_f}{EI}}, \quad M = \frac{m_f}{m},$$

$$\bar{x}_1 = \bar{v} L^2 \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau, \quad \bar{x}_f = uL \sqrt{\frac{m}{EI}} \tau$$

여기서  $\bar{v}$ 는  $v/L$ 이고,  $\tau$ 는 무차원 시간을 나타낸다.  $M_m, U$ , 그리고  $M$ 은 각각 무차원 이동 질량, 무차원 유속, 그리고 무차원화 된 유체의 질량을 나타낸다. 또,  $d$ 와  $\xi$ 는 단순지지 파이프의 무차원 횡변위 및 수평변위를 각각 나타낸다. 식 (15)의 무차원 매개변수를 이용하여 계의 무차원화된 운동방정식을 행렬형태로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K} \mathbf{d} = \mathbf{0} \quad (16)$$

여기서  $(\cdot)$ 는 무차원화된 시간  $\tau$ 에 대한 미분을 나타내며, 식 (16)의 각 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M} = & \sum_{i=1}^n \left\{ \int_0^{\xi_c} \phi_{i1}^2(\xi) d\xi + \int_{\xi_c}^1 \phi_{i2}^2(\xi) d\xi \right. \\ & + \int_0^{\xi_c} M \phi_{i1}^2(\bar{x}_f) d\xi_f + \int_{\xi_c}^1 M \phi_{i2}^2(\bar{x}_f) d\xi_f \\ & \left. + M_m \phi_{iy}^2(\bar{x}_1) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C} = & \sum_{i=1}^n \left\{ M \int_0^{\xi_c} \frac{d}{d\tau} [\phi_{i1}^2(\bar{x}_f)] d\xi_f \right. \\ & + M \int_{\xi_c}^1 \frac{d}{d\tau} [\phi_{i2}^2(\bar{x}_f)] d\xi_f \\ & \left. + M_m \frac{d}{d\tau} [\phi_{iy}^2(\bar{x}_1)] \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K} = & \sum_{i=1}^n \left[ \int_0^{\xi_c} \{ \phi_{i1}''(\xi) \}^2 d\xi + \int_{\xi_c}^1 \{ \phi_{i2}''(\xi) \}^2 d\xi \right. \\ & + \left\{ \beta \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{iy}'(\bar{x}_1) \} \phi_{iy}(\bar{x}_1) \right. \\ & \left. - \gamma \{ \phi_{iy}'(\bar{x}_1) \}^2 + \beta \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{iy}(\bar{x}_1) \} \phi_{iy}'(\bar{x}_1) \right\} \\ & + \sqrt{M} U \int_0^{\xi_c} \left[ \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{i1}'(\bar{x}_f) \} \phi_{i1}(\bar{x}_f) \right. \\ & + \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{i1}(\bar{x}_f) \} \phi_{i1}'(\bar{x}_f) \left. \right] d\xi_f \\ & + \sqrt{M} U \int_{\xi_c}^1 \left[ \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{i2}'(\bar{x}_f) \} \phi_{i2}(\bar{x}_f) \right. \\ & + \frac{d}{d\tau} \{ \phi_{i2}(\bar{x}_f) \} \phi_{i2}'(\bar{x}_f) \left. \right] d\xi_f \\ & - U^2 \int_0^{\xi_c} \{ \phi_{i1}(\bar{x}_f) \}^2 d\xi_f - U^2 \int_{\xi_c}^1 \{ \phi_{i2}(\bar{x}_f) \}^2 d\xi_f \\ & + K_R^* \left[ \{ \phi_{2i}(\xi_2=0) \}^2 - 2 \{ \phi_{2i}(\xi_2=0) \} \phi_{1i}(\xi_1=\xi_c) \right. \\ & \left. + \{ \phi_{1i}(\xi_1=\xi_c) \}^2 \right] \end{aligned} \quad (19)$$

식 (16)은 고유치 문제를 해결하기 위하여 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\mathbf{M}^* \frac{d\boldsymbol{\eta}}{d\tau} + \mathbf{K}^* \boldsymbol{\eta} = \mathbf{0} \quad (20)$$

복소모드 해석에서 식 (20)의  $\boldsymbol{\eta}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\boldsymbol{\eta} = e^{\lambda\tau} \boldsymbol{\Theta} \quad (21)$$

여기서  $\lambda$ 는 복소수 값의 고유치이고,  $\boldsymbol{\Theta}$ 는 모드형상을 나타내는 벡터이다.

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

이 연구에서는 이론해석에서 유도된 무차원 운동방정식을 이용하여 이동질량, 유체 및 크랙이 단순지지 파이프의 횡방향 진동에 미치는 영향을 수치해석을 통해 비교, 고찰하였다. 수치해석은 Matlab(6.1)에서 4차의 Runge-Kutta 방법<sup>(11)</sup>으로 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 고찰하였으며, 크랙과 이동질량을 가지는 단순지지 파이프의 진동수 해석은 3차 모드까지 수행하였다. 수치해석 예제에 사용한 단순지지 파이프의 파라미터는 Table 1에 나타내었다. 또, 무차원화된 이동질량의 크기는 0.1을 사용하여 수치 해석하였다.

Fig. 3은 크랙이 존재하는 위치( $x_c/L$ )에 따른 단순지지 파이프의 횡변위를 표현하였다. 가로축은 단순지지 파이프를 이동하는 이동질량의 위치를 무차원으로 나타낸 것이며, 세로 축은 단순지지 파이프의 횡변위를 표현하고 있다. 크랙의 크기( $\theta/\pi$ )는 0.2로 하여 해석하였다. 유체를 갖는 단순지지 파이프에 크랙이 존재하는 위치가 파이프 중앙에 위치할 때, 파이프의 횡변위가 가장 크고, 크랙이 파이프의 중앙 부근에 위치하는 경우에 비해 파이프의 양 끝단 부분에 크랙이 존재하는 경우에 비교적 파이프의 횡변위가 작아짐을 알 수 있다. 이동질량의 위치가 보의 가운데 있는 경우, 크랙의 위치가 0.1인 경우에 비해 크랙의 위치가 0.5인 경우의 횡변위는 약 7.28% 더 커짐을 볼 수 있다.

Table 1 Specifications of the cracked pipe

Property	Data
Total length of beam ( $L$ )	2 (m)
Outer-radius of beam ( $R_o$ )	0.1 (m)
Inner-radius of beam ( $R_i$ )	0.08 (m)
Young's modulus ( $E$ )	$2.08 \times 10^{11}$ (N/m <sup>2</sup> )
Density	7860 (kg/m <sup>3</sup> )

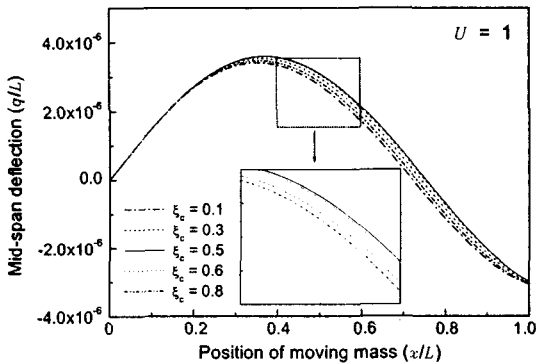


Fig. 3 Mid-span deflection of the cracked simply supported fluid flow pipe with the moving mass according to crack position

Fig. 4는 크기가 0.2인 크랙이 파이프의 30% 지점에 위치할 때, 유동유체의 속도에 따른 파이프의 횡변위를 도시한 것이다. Fig. 4(a)는 이동질량의 속도가 1 m/s 인 경우로, 파이프 최대 횡변위는 유속과 서로 비례적이다. Fig. 4(b)는 이동질량의 속도가 2 m/s 인 경우를 표현한 것이다. 단순지지 파이프의 최대 횡변위는 유체가 없는 경우에 비해 유체의 무차원 속도가 2 일 때 약 22.57% 증가하였다. Fig. 4(c)는 이동질량의 속도가 4 m/s 인 경우이며, 이동질량이 파이프의 전 구간을 이동하는 동안 파이프의 횡변위와 유속은 서로 비례적임을 알 수 있다.

Fig. 5는 무차원 유속이 1, 이동질량의 속도가 2 m/s 인 경우, 크랙이 존재하는 위치에 따른 단순지지 파이프의 진동수를 이동질량 위치에 따라 3 차 모드까지 표현한 것이다. Fig. 5(a)의 1 차 모드에서는 파이프에 크랙이 존재하는 위치가 파이프 중앙에 있는 경우 진동수가 가장 작으며, 크랙의 위치가 파이프의 양 끝단 부근에 위치하

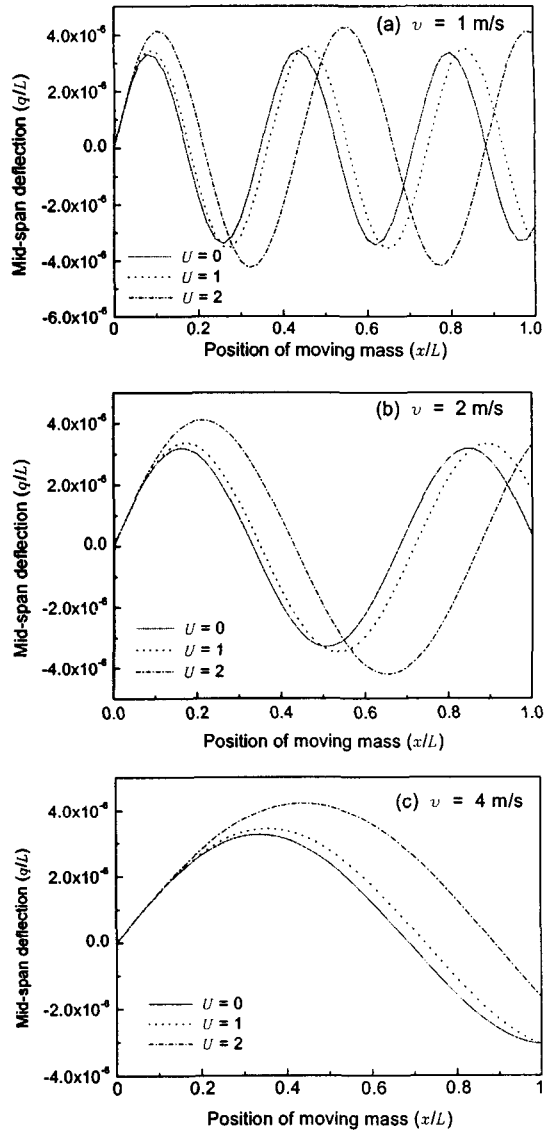


Fig. 4 Mid-span deflection of the cracked simply supported fluid flow pipe with the moving mass according to fluid velocity

는 경우 진동수가 큰 값을 나타낸다. Fig. 5(b)의 2 차 모드에서는 크랙의 위치가 파이프의 중앙에 있는 경우에 단순지지 파이프의 진동수가 가장 크며, 크랙의 위치가 0.3인 지점에 있을 때 진동수가 가장 작은 값을 나타낸다. 이것은 단순지지 보의 2 차 모드형상에 기인한 결과라 할 수 있다. Fig. 5(c)의 3 차 모드에서는 1 차 모드에서와 같이 크랙의 위치가 중앙 부근에 위치할 때

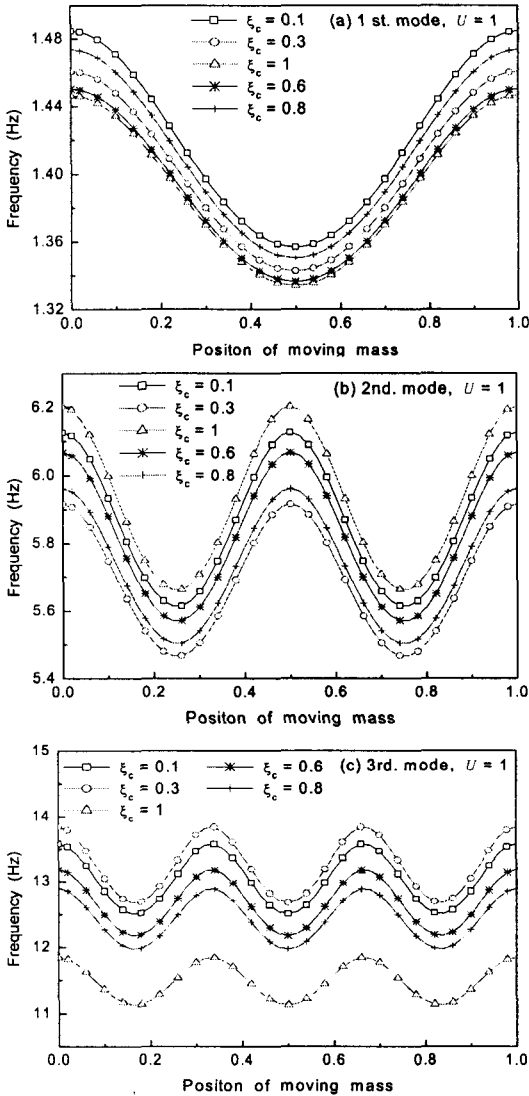


Fig. 5 Frequency of the cracked simply supported fluid flow pipe with the moving mass

가 양 끝단 부근에 크랙이 위치하는 경우에 비해 진동수가 더 작은 값을 나타낸다.

Fig. 6은 크기가 0.2인 크랙이 파이프의 30% 지점에 위치하고, 이동질량의 속도가 2 m/s인 경우, 유체의 속도에 따른 파이프의 진동수를 3차 모드까지 표현한 것이다. 전 모드에 걸쳐서 유속과 진동수는 서로 반비례적인 경향을 보인다. Fig. 6(a)의 1차 모드를 살펴보면 이동질량이 파이프 위를 이동하는 전 구간에서 단순지지 파이프의 진동수는 유속이 없는 경우에 비하여 무

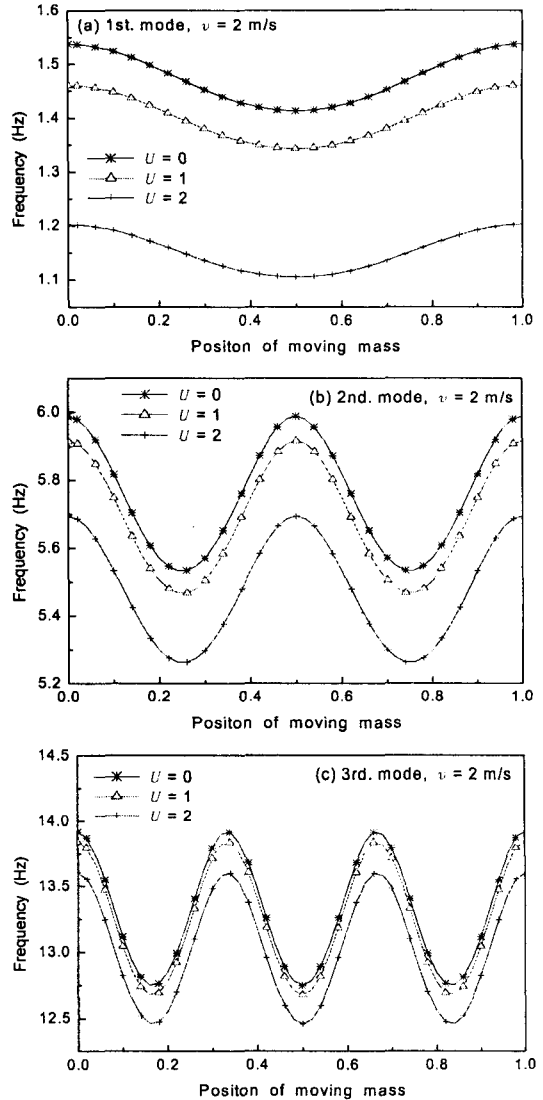


Fig. 6 Frequency of the cracked simply supported fluid flow pipe with the moving mass

차원 유속이 1 일 때 약 5.23% 정도, 무차원 유속이 2인 경우에는 약 27.85% 정도 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 수치해석 예제를 검증하기 위하여 참고문헌 (3)의 시스템 파라미터를 적용하여 이 연구결과와 비교해서 도시한 것이다. 참고문헌 (3)은 이동질량과 유체가 없는 중공축에 크기 0.2의 크랙이 중공축의 30% 지점에 존재하는 경우이다. Fig. 7(c)는 참고문헌 (9)의 유체유동을 갖는 크랙이 없는 외팔 파이프의 수치해석 방법을 단순

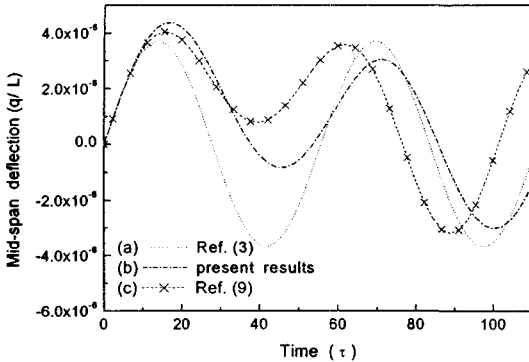


Fig. 7 Mid-span deflection of the simply supported pipe

지지 보의 고유함수를 이용하여 해석한 결과이며, 입력 파라미터의 파이프 직경이 파이프 길이에 비해 매우 작기 때문에 이동질량의 영향이 두드러지게 나타남을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

이동질량을 가지는 유체유동 파이프 구조물에 크랙 형태의 결함이 존재할 때 파이프 구조물의 횡진동 특성에 미치는 크랙과 유속의 영향을 수치해석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파이프에 크랙이 존재하는 위치가 파이프 양 끝단부분에 위치할 때에 비해 중앙부분에 위치할 때 파이프의 횡변위가 더 크다.

(2) 이동질량의 속도에 관계없이 파이프의 횡변위와 유속은 서로 비례적이며, 진동수는 이동질량의 속도가 빠를수록 감소하는 경향을 보인다.

(3) 유속이 일정한 경우, 1차 모드에서는 파이프에 크랙이 존재하는 위치가 파이프 중앙에 있는 경우에 비해 파이프의 양 끝단 부근에 위치할 때 진동수가 더 큰 값을 가진다.

(4) 이동질량이 일정한 속도를 유지하는 경우, 전 모드에 걸쳐서 단순지지 파이프의 진동수는 유체의 속도와 서로 반비례적인 경향을 보인다.

(5) 위의 연구결과를 바탕으로 컨베이어와 같이 이동질량을 가지는 파이프 형태 구조물의 진동특성을 관찰하여 크랙과 같은 결함의 존재 및 크랙이 존재하는 위치를 파악하여 구조물의 안전진단에 기여할 수 있을 것으로 판단되어진다.

#### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) Takahashi, I., 1999, "Vibration and Stability of non-uniform Cracked Timoshenko Beam Subjected to Follower Force," *Computers and Structures*, Vol. 71, pp. 585~591.
- (3) Liu, D., Gurgenci, H. and Veidt, M., 2003, "Crack Detection in Hollow Section Structures Through Coupled Response Measurements," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, pp. 17~29.
- (4) 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.
- (5) Dimarogonas, A. D., 1996, "Vibration of Cracked Structures : A State of The Art Review," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 5, pp. 831~857.
- (6) Stanisic, M. M., 1985, "On a New Theory of the Dynamic Behavior of the Structures Carrying Moving Masses," *Ingenieur-archiv*, Vol. 55, pp. 176~185.
- (7) Lee, H. P., 1996, "Dynamic Response of a Beam with a Moving Mass," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, pp. 289~294.
- (8) Sugiyama, Y., Kawagoe, H., Kishi, T. and Nishiyama, S., 1988, "Studies on the Stability of Pipes Conveying Fluid," *JSME International Journal*, Series 1, Vol. 31, No. 1, pp. 20~26.
- (9) Yoon, H. I. and Son, I. S., 2002, "Dynamic Characteristics of Cantilever Pipe Conveying Fluid with the Moving Masses," *Transactions of the KSNVE*, Vol. 12, No. 7, pp. 550~556.
- (10) Lee, U. S, Park, C. H. and Hong, S. C., 1991, "Dynamic Stability and Response Analysis of Piping System with Internal Flow," *Journal of KSME*, Vol. 15, No. 6, pp. 1861~1871.
- (11) MATLAB Reference Guide, 1992, The Math Works, Inc.