

단순지지 송수관의 동특성에 미치는 이동질량의 영향

윤한익

동의대학교 기계·산업시스템 공학부

Influence of a Moving Mass on Dynamic Behavior of a Simply Supported Pipe Conveying Fluid

HAN-IK YOON

Faculty of Mechanical and Industrial system Engineering, Dong-eui University, Pusan 614-714, Korea

KEY WORDS: Pipe conveying fluid 송수관, Moving mass 이동질량, Dynamic behavior 동특성, Monconservative force 비보존력, flutter 플러터

ABSTRACT: A simply supported pipe conveying fluid and a moving mass upon it constitute a vibrational system. The equation of motion is derived by using Lagrange's equation. The influence of the velocity and the inertia force of a moving mass and the velocities of fluid flow in the pipe have been studied on the dynamic behavior of a simply supported pipe by numerical method. The velocities of fluid flow are considered within its critical values of the simply supported pipe without a moving mass upon it. Their coupling effects on the transverse vibration of a simply supported pipe are inspected too. As the velocity of a moving mass increases, the deflection of midspan of a simply supported pipe conveying fluid is increased and the frequency of transverse vibration of the pipe is not varied. Increasing of the velocity of fluid flow makes the frequency of transverse vibration of the simply supported pipe conveying fluid decrease and the deflection of midspan of the pipe increase. The deflection of the simply supported pipe conveying fluid is increased by a coupling of the moving mass and the velocities of a moving mass and fluid flow.

1. 서 론

파이프 속을 흐르는 유체에 의하여 파이프에 진동이 발생하며, 유체의 속도가 어떤 임계값에 도달하면 그 진동이 불안정하여 파이프가 좌굴되기도 한다. 점성이 작은 유체의 분사력은 파이프의 끝단에 집중종동력으로 작용하며, 점성이 큰 유체는 파이프의 내면에 작용하는 등분포 접선종동력을 일으킨다. 이러한 종동력들은 비보존력으로써 탄성계의 진동 및 안정성 해석에 중요한 인자가 된다.

Benjamin(1961)은 2 자유도를 갖는 분절된 송수관(articulated pipe)의 동역학에 대한 이론적 연구와 실험적 연구를 병행하였다. 그는 이 연구를 통해, 송수관이 양단 단순지지된 경우 유동 유체의 힘은 보존적(conservative)이고, 계는 어떤 임계유속 이상에서 발산형(divergence) 불안정을 일으키지만 유체가 나오는 유출끝단이 자유인 경우는 유동유체의 힘이 비보존적(non-conservative)이고, 계는 어떤 임계유속 이상에서 플러터(flutter)에 의한 불안정을 일으킨다는 것을 제시하였다. Benjamin의 이러한 유한 자유도계에서의 일반이론은 연속계(continuous system)에도 확장되는 것으로써 Gregory와 Paidoussis(1966)는 한 단이 고정되고 타단이 자유인 무한 자유도를 갖는 송수관의 불안정 문제를 연구하였다. 이러한 역학계에서는 어떤 임계유속

이상에서 플러터에 의한 불안정 현상을 용이하게 실현할 수 있다. 한편, 외팔 송수관에 있어서 자유단쪽을 단순지지하면 안정한 유속에서도 계는 발산형 불안정이 된다. Chen(1971)은 양단이 단순지지된 송수관에 시간 종속적(time-dependent)인 유속이 주어지는 경우에 있어서 송수관의 파라메타 불안정(parametric instability)에 대한 연구를 하였다.

Kenney(1954)등은 로켓의 시험트랙을 모델로 하여 탄성기초 위에 놓인 보에 빠른 이동속도의 이동하중이 통과할 때에 응답의 해석적 해와 공진상태에서의 임계속도를 구하였고 감쇠가 있을 때의 보 처짐에 관한 확대계수를 구하였다.

Daniel(1971)은 주기적으로 많은 탄성 지지점을 갖는 Bernoulli-Euler 보에서 주파수응답 행렬을 결정하기 위하여 해석적인 방법을 이용하였고 등간격으로 부착된 감쇠를 갖는 계에서는 수치해석으로 응답을 구하였다. 그리고 주기적으로 지지된 연속보의 구조물에서 진동응답을 전달행렬법(Transfer matrix methods)과 정규모드법(Normal mode methods)을 써서 구하였다.

Richardson(1974)은 고속운송차량과 안내로의 설계 및 그 상호관계를 다루었다. Smith와 Wormley(1975)는 등간격으로 지지된 연속 안내보에 일정 크기 이동하중이 일정한 속도로 작용할 때 Fourier변환을 이용하여 안내보의 처짐을 동적확대계수로 나타내었고 공진 영역에서의 보의 감쇠영향도 고찰하였다. Smith등

은 짧고 많은 스패, 또는 연속스패너로 지지된 구조물과 상호작용하는 차량의 동적특성을 해석하고 많은 스패너에서 공진이 일어나는 운전조건을 찾아서 합성공진 진폭을 계산하였다. Chonan(1975)은 축하중과 이동하중을 받으며 탄성 지지되어 있는 Timoshenko보의 횡진동 해를 구하고 축 하중의 영향을 논하였다. Wilson(1973)은 집중질량으로 된 이동하중이 아닌 등분포 질량으로 된 이동하중에 대한 보의 응답을 고려하였다. Licari등(1962)은 스프링-질량-감쇠계로 구성된 이동하중을 받는 보의 동적응답을 연구하였다.

이상의 연구자들은 유체유동에 의한 파이프의 횡진동과 안정성, 그리고 이동질량이 보의 횡진동에 미치는 영향 각각에 대하여 연구하였으나 이들의 연성이 보의 횡진동과 안정성에 미치는 영향에 대하여는 연구하지 아니하였다.

본 연구에서는 점성이 매우 작은 유동유체의 분사력에 의하여 단순지지된 파이프의 끝단에 집중 종동력이 작용하고 동시에 파이프 위를 집중질량이 일정 속도로 이동하는 탄성계를 고려하였다. 이러한 계는 높은 온도를 가진 이동질량 또는 주기적인 많은 수의 이동질량에 의하여 파이프에 발생하는 열을 파이프 내에 빠르게 흐르는 냉각수로써 냉각시키는 장치에서 나타난다. 파이프의 끝단에 작용하는 집중 종동력의 크기는 유동유체 속도의 제곱에 비례하므로 파이프의 횡진동과 안정성은 파이프속을 흐르는 유체의 속도와 밀접한 관계에 있다. 또한 이동 질량 역시 파이프의 횡진동에 크게 관계되고 있다. 그러므로 이동 질량의 속도와 유동유체의 속도가 파이프의 횡진동에 미치는 영향을 검토하였으며, 동시에 유동유체의 속도와 이동질량의 속도의 연성 효과를 해석하여 파이프의 횡진동을 제어할 수 있는 특성들을 연구하여 계의 설계 변수들을 제시하였다.

2. 이론해석

내부에 유체가 흐르는 단순지지된 파이프의 위로 집중질량이 일정속도로 이동하는 탄성계의 개략도는 Fig. 1에 보인 바와 같다. M 은 이동질량, v 는 이동질량의 속도, 그리고 u 는 유동유체의 속도이다.

유동유체의 속도, 이동질량의 크기 그리고 그 이동속도가 단순보의 동특성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 Lagrange 방정식을 이용하여 계의 운동방정식을 유도한다.

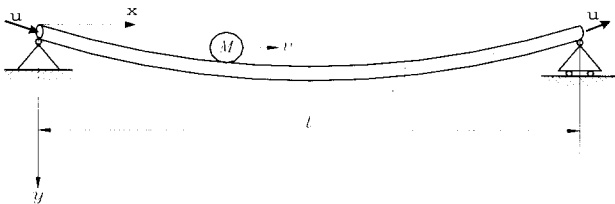


Fig. 1 A simply supported pipe conveying fluid with a moving mass

2.1 단순지지 파이프의 에너지식

단순지지 파이프의 진동형은 $\sum_{i=1}^{\infty} d_i(t) \phi_i(x)$ 로 표현되므로 단순지지 파이프의 횡변위와 속도는

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} d_i(t) \phi_i(x) \tag{1}$$

$$\dot{y} = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{d}_i(t) \phi_i(x) \tag{2}$$

이다. 여기서 $\phi_i(x)$ 는

$$\phi_i(x) = \sin \frac{i\pi x}{l} \tag{3}$$

로써 단순지지 파이프의 정규직교 고유함수이며, $d_i(t)$ 는 시간의 함수이고, (\cdot) 는 시간에 대한 미분을 나타낸다. 그러므로 단순지지 파이프의 운동에너지와 포텐셜에너지는 각각 다음과 같다.

$$T = \frac{m_p l}{4} \sum_{i=1}^{\infty} \dot{d}_i^2(t) \tag{4}$$

$$V = \frac{EI}{2 l^3} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(i\pi)^4}{2} d_i^2(t) \tag{5}$$

여기서, m_p 는 파이프의 단위 길이당 질량, l 은 파이프의 길이, EI 는 굽힘강성계수이고, i 는 모드의 차수를 나타낸다.

2.2 유동 유체의 에너지식

파이프에 대한 유체의 상대속도가 u 이므로, 유체의 절대속도에는 파이프의 운동이 포함되어야 한다. 따라서 파이프의 횡변위가 미소하다고 가정하면, 유체의 절대속도의 수직성분, 즉 y 방향성분은 $\dot{y} + u y'$ 이고, x 축에 평행한 수평성분은 $u(1 - \frac{1}{2} y'^2) - \dot{c}$ 로 근사할 수 있다. 여기서 (\cdot) 는 x 에 대한 미분이며, \dot{c} 는 단순지지 고정점에 대한 파이프의 수평변위의 속도이다. 이 연구에서 고려하는 계에서 파이프의 수평변위는 대단히 미소하므로 \dot{c} 를 무시하고 유속의 합을 구하면

$\left\{ u^2 + 2u y y' + \dot{y}^2 + \frac{u^2}{4} y'^4 \right\}^{\frac{1}{2}}$ 이 된다. 또 미소항의 고차항 y'^4 을 생략하면 유동유체의 운동에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{1}{2} \int_0^l m_f (u^2 + 2u y y' + \dot{y}^2) dx \\ &= \frac{1}{2} m_f l u^2 + \frac{1}{4} m_f l \sum \dot{d}_i^2(t) \end{aligned} \tag{6}$$

유동유체의 포텐셜에너지는 유량과 중력을 고려하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_f &= - \int_0^l m_f g y dx \\ &= - m_f g \sum_{i=0}^{\infty} \frac{l}{i\pi} (1 - \cos i\pi) d_i \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 m_f 는 파이프의 단위길이당 유동유체의 질량이고, g 는

중력가속도이다.

2.3 유동유체의 분사력에 의한 일량

유동유체의 분사력에 의하여 파이프에 작용되는 힘은 $x=l$ 인 점에 작용하는 집중 접선 중동력이 된다. 이러한 비보존적인 접선 중동력에 의한 일은 접선중동력의 x 방향 분력인 보존력 성분(conservative force component)에 의한 일과 접선중동력의 y 방향 분력인 비보존력 성분(nonconservative force component)에 의한 일로 구분된다. 분사력이 ρAu^2 이므로 집중 접선 중동력의 보존력 성분에 의한 일은

$$W_c = \frac{1}{2} \int_0^l \rho Au^2 (y')^2 dx \quad (8)$$

$$= \frac{1}{4} \rho Au^2 l \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 d_i^2(t)$$

이고, 집중 접선 중동력의 비보존력 성분에 의한 일은 다음과 같다.

$$W_N = -\rho Au^2 y'(l, t) y(l, t) \quad (9)$$

$$= 0$$

여기서, ρ 는 유동유체의 밀도, A 는 파이프의 내부단면적이다.

2.4 이동질량 M 의 에너지 식

이동질량 M 의 수평속도가 v 이면 그 수평변위는

$$x = \int_0^t v dt \quad (10)$$

이고, 수직 변위를 y_M 이라고 하면 이동질량 M 은 집중질량이므로 그 운동에너지는

$$T_M = \frac{1}{2} M(\dot{y}_M^2 + v^2) \quad (11)$$

이고, 그 포텐셜에너지는

$$V_M = -Mg y_M \quad (12)$$

$$= -Mg \sum_{i=1}^{\infty} d_i(t) \phi_i(x)$$

이다. y_M 은 이동질량 M 의 연직방향 변위인 동시에 단순보의 횡변위이다. 즉 이동질량 M 은 단순보와 분리되지 않고 접촉된 상태로 이동한다고 본다.

따라서

$$y_M = y(x, t)|_{x=f(t)} \quad (13)$$

$$\dot{y}_M = \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial t} \right) \Big|_{x=f(t)} \quad (14)$$

이다. 여기서

$$x = f(t) = \int_0^t v dt \quad (15)$$

임을 고려하고, 식 (1)을 식 (14)에 대입하면

$$\dot{y}_M = v \sum_{i=1}^{\infty} d_i(t) \phi_i[f(t)] + \sum_{i=1}^{\infty} \dot{d}_i(t) \phi_i[f(t)] \quad (16)$$

이다. 식 (16)을 식 (11)에 대입하여 정리하면 이동질량 M 의 운동에너지는 다음과 같다.

$$T_M = \frac{1}{2} M \left\{ v^2 \sum_{i=1}^{\infty} d_i^2(t) \phi_i'^2[f(t)] \right. \quad (17)$$

$$+ 2v \sum_{i=1}^{\infty} d_i(t) \dot{d}_i(t) \phi_i[f(t)] \phi_i'[f(t)]$$

$$\left. + \sum_{i=1}^{\infty} \dot{d}_i^2(t) \phi_i^2[f(t)] \right\} + \frac{1}{2} M v^2$$

2.5 계의 운동방정식

계의 운동방정식을 유도하기 위하여 앞에서 구한 일과 에너지 식을 Lagrange 방정식(Greenwood, 1977)에 대입하여 정리하면 계의 운동방정식은 다음 식 (18)과 같다

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{ml}{2} + M \sin^2\left(\frac{i\pi v t}{l}\right) \right\} \ddot{d}_i \quad (18)$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ M v^2 \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \cos^2\left(\frac{i\pi v t}{l}\right) \right.$$

$$\left. - \frac{(i\pi)^4}{2} \frac{EI}{\beta^3} + \frac{1}{2} m i u^2 \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \right\} d_i$$

$$+ Mg \sum_{i=1}^{\infty} \sin\left(\frac{i\pi v t}{l}\right) + m_f g \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{i\pi}\right) (1 - \cos i\pi)$$

여기서 $m = m_p + m_f$ 이다.

계의 운동방정식 (18)을 무차원화 시키기 위하여 다음의 매개 변수를 도입한다.

$$\bar{M} = \frac{M}{ml}, \quad \bar{E} = \frac{EI}{ml^4}, \quad \bar{m}_f = \frac{m_f}{m}, \quad \bar{g} = \frac{g}{l}, \quad (19)$$

$$\bar{d} = \frac{d}{l}, \quad \bar{v} = \frac{v}{l}, \quad \beta = \pi \bar{v} t, \quad \bar{u} = \frac{u}{l}$$

매개변수 (19)를 계의 운동방정식(18)에 대입하여 정리하면 식 (20)과 같이 무차원화된 계의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{2} + \bar{M} \sin^2(i\beta) \right\} \ddot{\bar{d}}_i \quad (20)$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ (i\pi)^2 \bar{v}^2 \bar{M} \cos^2(i\beta) - \frac{1}{2} (i\pi)^4 \bar{E} \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2} \bar{m}_f (i\pi)^2 \bar{u}^2 \right\} \bar{d}_i + \bar{M} \bar{g} \sum_{i=0}^{\infty} \sin i\beta$$

$$+ \bar{m}_f \bar{g} \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{1}{i\pi}\right) (1 - \cos i\pi)$$

운동방정식 (20)은 2계 상미분방정식이므로 다음과 같이 보조 기호

$$\bar{z}_i = \bar{d}_i, \quad \bar{z}_i = \ddot{\bar{d}}_i = f(\bar{d}_i, \bar{z}_i, t) \quad (21)$$

를 사용하여 변수를 치환하면 1계 상미분방정식계로 변환된다. 따라서 1계상미분방정식계는 행렬을 사용하여 다음 식 (22)로 나타내어 진다.

$$[A] \{\dot{\bar{X}}\} = [B] \{\bar{X}\} + \{C\} \quad (22)$$

여기서 $\{\bar{X}\}$ 와 $\{\bar{Y}\}$ 는 좌표 상태 벡터이다.

3. 수치계산 결과 및 고찰

계의 운동방정식 (18)에서 유동유체의 속도 u 와 이동질량 M 및 그 속도 v 는 단순지지된 파이프의 횡변위 d 를 결정하는 가변적 요소들이다.

만일 이동질량 M 을 영으로 놓으면 유동유체의 분사력이 작용하는 단순지지된 파이프의 횡진동 운동방정식이 되고 u 의 크기에 따라서 계의 진동수와 횡변위가 결정되는 탄성계의 안정성 문제가 된다. 그러나 단순지지된 경우에는 종동력(follower force)인 유체분사력의 비보존적 성분에 의하여 이루어지는 일의 양이 영이 되므로 유체 분사력은 단순지지된 파이프로 하여금 플러터 진동을 일으키게 하지 못하고, 유체 분사력이 일정한 임계값에 도달하면 진동수가 영이 되어 파이프의 횡진동이 없어지고 계의 고유치 곡선은 발산하게 되어 단순지지된 파이프는 좌굴된다. 즉 정적 불안정이 된다(Leiphoz, 1980).

이 연구에서는 이동질량과 그 속도 v , 그리고 유동유체의 속도 u 의 크기에 대한 단순지지된 파이프의 횡진동 특성을 Runge-Kutta 4차식의 수치계산 방법으로 비교·고찰 하였다. 이때, 수치계산 결과는 무차원화한 이동질량의 위치변화에 따른 단순지지 파이프 중앙에서의 무차원 횡변위로 나타내어 유동유체의 속도 u 와 이동질량의 속도 v 에 대한 파이프의 횡진동 특성 변화를 관찰할 수 있도록 하였다. 수치계산에 있어서 제 1차 모드의 횡변위가 제 2차 또는 제 3차 모드의 횡변위에 비하여 일반적으로 대단히 크기 때문에 여기서는 제 1차 모드에 국한하였다. 단순지지된 파이프의 길이는 10 m, 종탄성계수는 $197 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 단면 2차모멘트는 $7.76 \times 10^{-7} \text{ m}^4$, 외경은 0.1 m 이며 단위길이당 질량은 4.962 kg이다. 따라서 파이프의 단위길이당 유체의 질량은 7.78 kg이다.

Fig. 2 에는 유동유체의 이동질량의 속도가 각각 $u = 10 \text{ m/s}$ 와 $v = 10 \text{ m/s}$ 일 때 세 이동질량이 단순지지된 파이프의 횡변위와 진동수에 미치는 영향을 나타내었다. 이동질량의 속도가 10 m/s 이므로 길이 10 m의 단순지지된 파이프 위를 이동질량이 통과하는 데는 1초가 걸린다. 즉 Fig. 2의 곡선으로부터 계의 진동수를 알 수 있다. 유동유체가 없는 단순지지된 파이프의 횡진동수가 운동방정식(18)로부터 2.76 Hz로 계산됨을 고려하면 유동유체와 이동질량의 연성결과로 인해 계의 횡진동수가 감소됨을 알 수 있다. 또 이동질량이 커지면 파이프의 횡변위를 증가시킴과 동시에 계의 횡진동수를 감소시킴을 확인할 수 있다.

Fig. 3에는 이동질량이 20 kg이고 그 속도가 10 m/s 일 때 유동유체의 세 속도에 대한 단순지지된 파이프의 제 1차 횡진동 모드의 거동을 나타내었다. 이 곡선들은 1초동안에 일어나는 현상이다. $u = 20 \text{ m/s}$ 의 곡선은 약 1.5 Hz 정도이고 $u = 0$ 의 곡선은 약 1.6 Hz 정도이다. 따라서 유속이 증가함에 따라 단순지지된 파이프의 진동수가 조금씩 감소한다는 Chen(1971)의 연구와 일치하며, 이동질량 역시 파이프의 진동수를 감소시킨다. 유속이 0에서 10 m/s로 증가하였을 때 단순지지된 파이프의 횡변위 즉 진폭에 미치는 영향은 미소한 반면 유속 10 m/s에서 20 m/s로

증가하였을 때 단순지지된 파이프의 횡변위에 미치는 영향이 크게 나타나는 이유는 유동유체의 분사력이 유속의 제곱에 비례하기 때문이다.

Fig. 4는 계의 운동방정식 (18)에서 이동질량의 관성력을 무시한 경우에 대한 결과이다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 결과와 비교하면 이동질량의 관성력의 영향을 관찰할 수 있다. 이동질량의 관성력을 무시한다 함은 이동질량에 상당하는 이동하중에 의한 단순지지된 유체유동 파이프의 동적거동을 의미한다고 볼 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4에서 이동질량의 관성력은 파이프의 진폭을 증가시키는 반면 그 진동수는 감소시킴을 확인할 수 있다.

Fig. 5에는 이동질량의 속도가 20 m/s로 증가되었을 때 단순지지된 유체유동 파이프의 동적거동을 나타내었다. $v = 20 \text{ m/s}$ 이므로 이동질량이 파이프 위를 이동하는 데 걸리는 시간은 0.5초이다. 따라서 Fig. 5의 곡선은 0.5초 동안의 파이프의 동적거동을 나타낸다. $u = 20 \text{ m/s}$ 의 곡선에서 파이프의 최대 횡변위는 $v = 10 \text{ m/s}$ 의 경우에 비하여 약 11% 이상 증가 되었다. 즉 이동질량의 속도 증가는 단순지지된 파이프의 횡변위(진폭)을 증가시킨다. 그러나 파이프의 횡진동수에는 영향을 미치지 않는다.

Fig. 6은 이동질량의 속도가 40 m/s인 경우에 대한 결과이다. 이때, 이동질량이 단순지지된 유체유동 파이프 위를 통과하는데 걸리는 시간은 0.25초이다. 파이프의 최대횡변위가 일어나는 시점은 약 0.4초 근방이므로 Fig. 6에는 파이프의 최대변위를 관찰

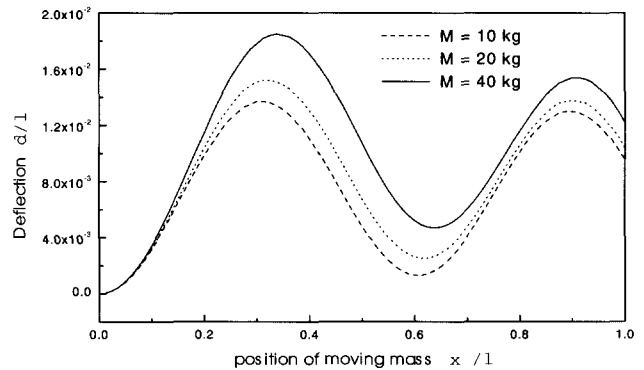


Fig. 2 Midspan deflection of the simple supported pipe versus the position of the moving mass along the pipe ($v=10 \text{ m/s}$, $u=10 \text{ m/s}$)

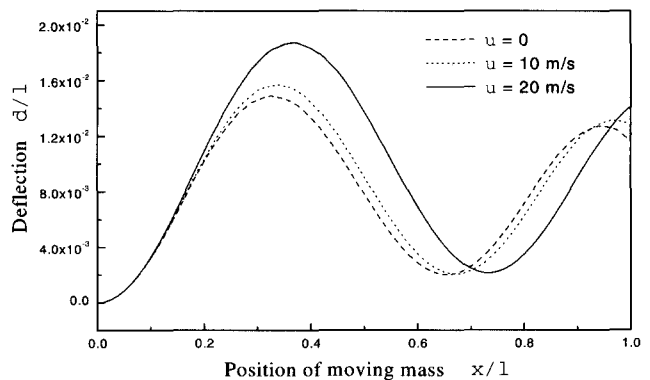


Fig. 3 Midspan deflection of the simple supported pipe versus the position of the moving mass along the pipe ($v=10 \text{ m/s}$, $M=20 \text{ kg}$)

할 수 없다. 이것은 이동하중에 의한 단순보의 최대횡변위는 이동하중이 단순보상을 떠난 후에 일어난다는 Weaver(1990)의 설명과 마찬가지로이다. 이동질량의 속도에 의하여 단순지지된 파이프의 횡변위가 크게 증가하여 소성변형(좌굴)에 이르면 그 속도

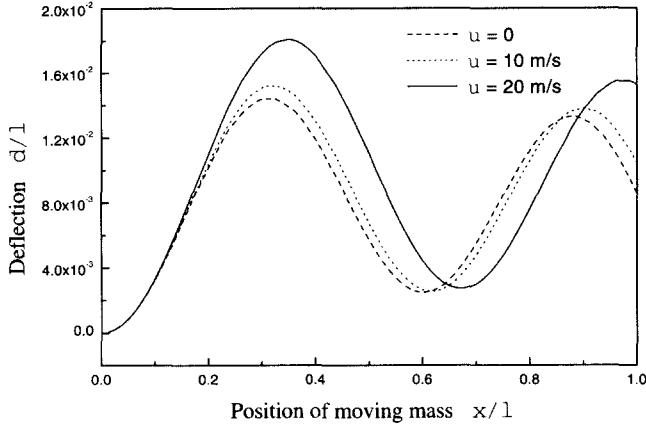


Fig. 4 Midspan deflection of the simple supported pipe versus the position of the moving mass without inertia force along the pipe ($v=10$ m/s, $M=20$ kg)

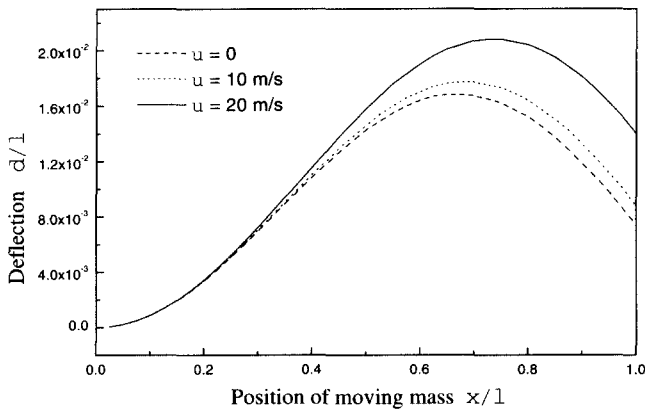


Fig. 5 Midspan deflection of the simple supported pipe versus the position of the moving mass along the pipe ($v=20$ m/s, $M=20$ kg)

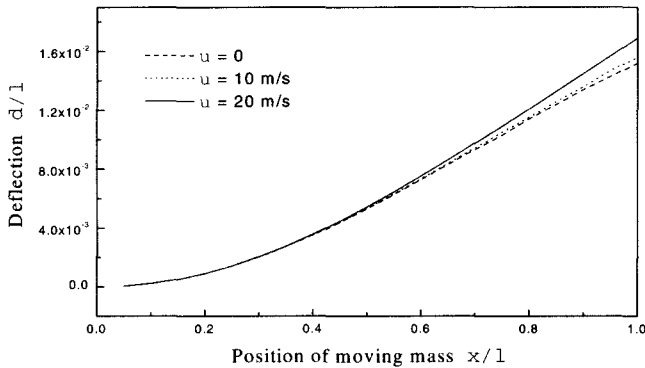


Fig. 6 Midspan deflection of the simple supported pipe versus the position of the moving mass along the pipe ($v=40$ m/s, $M=20$ kg)

를 이동질량의 임계속도라고 할 수 있다. Fig. 6의 곡선이 거의 발산의 형태를 갖추고 있음을 볼 때 $v = 40$ m/s는 거의 이동질량의 임계속도에 다달았음을 알 수 있다.

4. 결 론

내부에 점성이 매우 낮은 유체가 빠른 속도로 흐르는 파이프가 단순지지 되고, 그 위에 질량이 이동하는 계의 횡진동 특성에 미치는 유체의 속도와 이동질량 및 그 속도의 영향을 수치해석적 방법으로 연구하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 유동유체의 속도가 증가하면 단순지지된 파이프의 횡변위와 진폭은 증가하고, 파이프의 횡진동수는 감소한다.
- (2) 이동질량의 속도가 증가하면 단순지지된 파이프의 횡변위와 진폭은 증가하는 반면, 그 파이프의 횡진동수는 이동질량의 속도에 영향을 받지 않는다.
- (3) 유동유체의 속도와 이동질량의 크기가 연성되어 단순지지된 파이프의 횡변위를 증가시키고, 횡진동수를 감소시킨다.
- (4) 유동유체의 속도와 이동질량의 속도가 연성되어 단순지지된 파이프의 횡변위를 증가시킨다.

후 기

본 연구는 2000년도 동의대학교 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

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.

Chen, S. S.(1971). "Dynamic Stability of Tube Conveying Fluid", Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 97, pp 1469~1485.

Chonan, C.(1975). "The Elastically Supported Timoshenko Beam Subjected to An Axial Force and A Moving Load", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 17, 1975, pp 573~581.

Greenwood, D. T.(1977). "Classical Dynamics", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ

Gregory, R. W. and P ä idoussis(1966). "Unstable Oscillation of Tubular Cantilevers Conveying Fluid(II. Experiments)", Proceedings of the Royal Society(London), Series A, Vol. 293, pp 528~542.

Kenney, J. T., Jr.(1954). "Steady-State Vibrations of Beam on Elastic Foundation for Moving Load", Journal of Applied Mechanics TRANS. ASME, Dec.

Leipholz. H.(1980). "Stability of Elastic Systems", Sijthoff & Noordhoff, Alphen Ann den Rijn, Netherlands, 1980.

Licari, J. S. and Wilson, E. N.(1962). "Dynamic Response of a

- Beam Subjected to Moving Forcing System”, Proceedings of Fourth U. S. National Congress of Applied Mechanics, pp 481~425.
- Mead, D. J. (1971). “Vibration Resopnse and Wave Propagation in Periodic Structures”, Journal of Engineering for Industry. TRANS. ASME, Vol. 93, Series B.
- Richardson, H. H.(1974). “Transportation Vehicle/BeamEleva- ted Guideway Dynamic Interactions;A Stste-of-the-Art Review”, Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control, TRANS. ASME, Series G, Vol. 96. June.
- Smith, C. C., and Wormley, D. N.(1975). “Response of continuous periodically supported Guideway Beam to Travelling Vehicle Load”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, TRANS. ASME, Series G, Vol. 97, Mar.
- W. Weaver Jr., S. P. Timoshenko, D. H. Young(1990) “Vibration problems in Engineering”, John Wiley and Sons, Singapore
- Wilson, J. F.(1973). “Response of Simple Sans to Moving Mass loads”, AIAA Journal, pp 4~5.

2000년 12월 19일 원고 접수

2001년 2월 2일 수정본 채택