

〈논 문〉

유체유동에 의한 유연한 파이프의 불안정과 진동억제에 미치는 부가질량의 영향

Effects of Attached Masses on the Instability and Vibration Suppression of a Flexible Pipe Conveying Fluid

류봉조* · 정승호** · 이종원***

Bong-Jo Ryu, Seong-Ho Jung and Jong-Won Lee

(1999년 11월 26일 접수 : 2000년 2월 25일 심사완료)

Key Words : Attached Mass(부가질량), Dynamic Stability(동적안정성), Flexible Pipe(유연한 파이프), Conveying Fluid(유동유체), Vibration Suppression(진동억제)

ABSTRACT

The paper deals with vibration suppression and dynamic stability of a vertical cantilevered pipe conveying an internal flowing fluid and having an attached mass. Real pipe systems may have some valves or mechanical attached parts, which can be regarded as attached lumped masses. The effect of attached mass on the dynamic stability of a cantilevered pipe conveying fluid is investigated for different locations and magnitudes of the attached mass. The flow rate was controlled through motor pump output and measured by a flow meter. Experimental results in the vicinity of flutter fluid velocity were compared with theoretical predictions. It has been found that the experimental results are in substantial agreement with the theoretical predictions. Finally, in order to suppress the vibration of the pipe subjected to a disturbance, a control technique using an internal flowing fluid is introduced.

1. 서 론

내부 유동유체에 의한 가는 파이프 구조물의 진동과 동적안정성에 관한 연구는 공학의 여러분야에서 많은 관심의 대상이 되어왔다. 예를들면, 열 교환기 튜브, 원자핵 반응기의 연료요소들, 감시 및 제어튜브들, 항공기 엔진에서 열 차단기로 사용되는 가는 셸(shell)구조물들, 제트 펌프(jet-pump), 유압기계에서의 밸브들과 다른 기계구성 요소들, 핵반응기에서의 열 차단기 등을 들 수 있다.

일반적으로 파이프 구조물들의 불안정 현상이란 파이프 내부를 흐르는 유동유체의 유속이 어떤 임계 값을 넘으면 파이프가 좌굴(buckling)되기도 하고 큰 진폭의 진동으로 성장하는 플러터(flutter) 불안정을 일으키게 되는 현상을 일컫는다. 이러한 현상들은 많은 사람들의 일상생활에서도 쉽게 관찰될 수 있는 현상이며, 한 예로써, 정원에 놓아 둔 고무 호스(hose)내부를 흐르는 유체의 유속증가에 따라 호스가 좌우로 심하게 요동치는 현상을 들 수 있다. 이렇게 오래전부터 잘 알려진 현상임에도 불구하고 내부 유동유체에 의한 파이프 구조물의 동적안정성 및 진동에 관한 연구의 역사는 그렇게 오래되지 않았다.

유체 유동을 갖는 파이프 안정성 및 진동에 대한 연구의 최초 시도는 Ashley와 Haviland⁽¹⁾에 의해 이루어졌는데 그들은 Trans-Arabian 송유관에서 관찰된 파이프의 진동현

* 정회원, 대전산업대학교 기계설계공학과

** 정회원, 한국원자력연구소

*** 충남대학교 대학원 기계공학과

상을 규명하려는 시도를 하였다. 그 후, Feodos'ev⁽²⁾, Housner⁽³⁾, Niordson⁽⁴⁾은 양단이 단순지지된 파이프 구조물의 동역학에 관한 연구를 처음 시작하였는데, 이들은 각기 다른 방법으로 내부 유동유체가 있는 파이프 구조물의 선형 운동방정식을 구하면서 안정성에 관한 정확한 결론을 도출하였다.

Benjamin^(5,6)은 2 자유도를 갖는 분절된 파이프 (articulated pipe)의 동역학에 대한 이론과 실험연구를 병행하여 발표하였는데, 그는 파이프가 양단 단순지지된 경우에는 유동유체의 힘은 보존적(conservative)이고 계는 임계 유속값 이상에서 발산형태(divergence-type)의 불안정을 나타내지만, 유체가 흘러나오는 파이프의 끝단이 자유경계조건(free boundary condition)인 경우는 유동유체의 힘이 비보존적(non-conservative)이고 계는 임계 유속이상에서 플러터(flutter) 불안정 현상을 일으킨다는 것을 밝혀 내었다. Gregory와 Paidoussis^(7,8)는 무한 자유도를 갖는 유연한 외팔 파이프의 동적안정성 문제에 대한 이론과 실험적 연구를 병행하였다.

Chen⁽⁹⁾은 양단 단순지지된 파이프에 시간 종속적(time dependent)인 유속이 주어지는 경우에 있어, 파이프의 파라미터 불안정(parametric instability)에 대한 연구를 하였으나 그가 유도한 운동방정식에는 축 방향 가속도 항은 고려되지 않았다.

이러한 연구는 계속되어 내부를 흐르는 유동유체에 의한 단순 파이프의 안정성 문제에서 스프링지지된 파이프나 부가질량을 갖는 파이프의 안정성 문제로 발전되어졌다.

Becker⁽¹⁰⁾는 한단이 고정되고 타단이 스프링 지지되어 있는 수평 파이프에 있어, 스프링 상수가 작은 경우는 외팔보 구조물, 스프링 상수가 대단히 큰 경우는 한단고정 타단 핀지지 구조물로써, 각각 플러터와 좌굴현상이 일어남을 확인하였다.

Sugiyama와 그의 공동연구자들⁽¹¹⁾은 다양한 영률과 내부감쇠를 갖는 수평 파이프가 스프링지지된 경우, 스프링의 위치변화에 따른 파이프의 불안정 형태변화를 수치해석과 실험을 통하여 연구하였다. 그 후, Sugiyama와 그의 공동 연구자들⁽¹²⁾은 집중질량을 갖고 탄성 스프링에 의해 지지된 외팔 수평 파이프의 동적안정성에 미치는 스프링과 집중질량의 복합효과에 대해 이론과 실험적으로 연구하였다. 최근 Sugiyama와 그의 공동연구자들^(13,14)은 외란을 받는 수직 외팔 파이프의 안정화 방법의 하나로 내부 유동유체를 이용하여 파이프의 진동을 억제시켰고, 물속에 잠긴 수직 외팔 파이프의 동적안정성 문제에 대해서도 연구하였다. 그러나 이들은 파이프 구조물의 안정과 불안정의 경계가 되는 임계유속값을 이론적으로는 예측하였으나 실험적으로는 규명하지 못하였다. 또한, 현재까지 저자들이 조사

한 바에 의하면 밸브 등의 기계장치부를 갖는 수직 외팔 파이프 구조물의 동적안정성에 관한 수치해석적 연구는 소수 이루어져왔으나, 실험적 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 열 교환기 파이프, 일반 배관계 등의 파이프 구조물에 있어 밸브 등을 부가질량으로 간주하여, 첫째, 파이프에 내부 유동유체가 흐르는 경우 부가질량의 위치와 크기변화에 따른 계의 동적안정성을 수치해석과 실험을 통하여 연구하였으며, 둘째, 외부의 외란에 의한 파이프의 진동을 내부 유동유체의 최적 유속값(optimal fluid velocity)을 이용하여 파이프를 능동제어하는 기술을 실험적으로 보여준다.

2. 이론해석

2.1 수학적 모델 및 운동방정식

내부에 유체 유동을 받고 임의의 위치 L_a 에 부가질량 M 을 갖는 외팔 수직 파이프의 수학적 모델에 대한 그림은 Fig. 1과 같으며, 운동방정식을 유도하기 위하여 에너지 표현식을 사용하면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L m_p \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L m_f \left\{ U^2 + 2U \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \cdot \partial x} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right\} dx + \frac{1}{2} M \left(\frac{\partial w(L_a, t)}{\partial t} \right)^2 \quad (1)$$

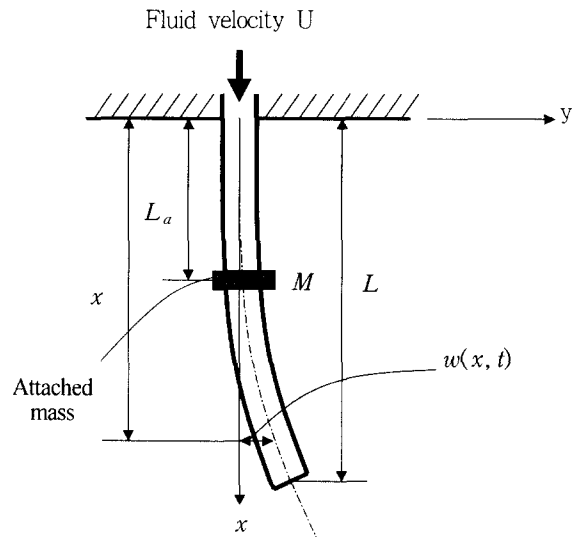


Fig. 1 A mathematical model of a vertical cantilevered pipe with an attached mass.

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx - \frac{1}{2} \int_0^L mg(L-x) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{1}{2} Mg \int_0^L \{1 - H(x-L_a)\} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \quad (2)$$

$$\delta W_{nc, id} = - \int_0^L E^* I \left(\frac{\partial^3 w}{\partial t \partial x^2} \right) \delta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) dx \quad (3)$$

$$\delta W_{c, ed} = - \int_0^L C \frac{\partial w}{\partial t} \delta w dx \quad (4)$$

$$\delta W_f = -m_f U \left(\frac{\partial w}{\partial t} + U \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta w |_{x=L} + m_f U^2 \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (5)$$

식 (1)은 운동에너지에 관한 식으로 각 항들은 순서대로 파이프, 유체 그리고 부가질량의 병진운동에 의한 운동에너지를 나타내며, m_p 와 m_f 는 각각 파이프와 유체의 단위길이당 질량을 나타낸다. 식 (2)는 포텐셜에너지에 관한 식으로 첫째항은 파이프의 굽힘에 의한 탄성 포텐셜에너지, 둘째항은 유체와 파이프의 중력 포텐셜에너지, 셋째항은 부가질량의 중력 포텐셜에너지를 나타낸다. 또한, E 는 파이프의 탄성계수, I 는 단면의 2차모멘트, m 은 단위 길이당 파이프와 유체의 질량, g 는 중력가속도, H 는 Heviside 단위 계단함수를 나타낸다.

식 (3)에서 식 (5)는 가상일들에 관한 것으로, 식 (3)은 재료의 내부감쇠(internal material damping)에 의한 가상일을 나타내고, 식 (4)는 외부점성감쇠(external viscous damping)에 의한 가상일, 식 (5)는 파이프의 자유단에서 유속 U 에 의한 가상일을 나타낸다. 또한, E^* 는 점성저항 계수(viscous resistance coefficient), C 는 외부 점성감쇠 계수(coefficient of external viscous damping)를 나타낸다.

식 (1)에서 식 (5)를 확장된 해밀톤 원리(extended Hamilton's principle)

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta V + \delta W_{nc, id} + \delta W_{c, ed} + \delta W_f) dt = 0 \quad (6)$$

에 대입하고 변분을 정리한 후, 계산상의 편의를 위하여 다음과 같은 무차원화된 파라미터들과 좌표들

$$\beta = \frac{m_f}{m}, \quad u = UL \sqrt{\frac{m_f}{EI}}, \quad \varphi = \frac{mgL^3}{EI} \\ \gamma = \frac{E^*}{EL^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \nu = \frac{CL^2}{\sqrt{EI}m}, \quad \bar{M} = \frac{MgL^2}{EI} \\ \alpha = \frac{M}{mL}, \quad \xi = \frac{x}{L}, \quad \xi_1 = \frac{L_a}{L}, \quad \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (7)$$

을 도입하면 다음과 같은 무차원화된 운동방정식과 경계조

건 식을 얻게된다.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + 2\beta^{\frac{1}{2}} u \frac{\partial^2 w}{\partial \tau \cdot \partial \xi} \\ u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \varphi \left\{ \frac{\partial w}{\partial \xi} - (1 - \xi) \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right\} \\ + \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \gamma \frac{\partial^5 w}{\partial \xi^4 \partial \tau} + \nu \frac{\partial w}{\partial \tau} + \alpha \delta(\xi - \xi_1) \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} \\ - \bar{M} \{1 - H(\xi - \xi_1)\} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 w(1, \tau)}{\partial \xi^2} + \gamma \frac{\partial^3 w(1, \tau)}{\partial \xi^2 \partial \tau} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial^3 w(1, \tau)}{\partial \xi^3} + \gamma \frac{\partial^4 w(1, \tau)}{\partial \xi^3 \partial \tau} = 0 \quad (10)$$

$$w(0, \tau) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial w(0, \tau)}{\partial \xi} = 0 \quad (12)$$

이제 식 (8)의 해 $w(\xi, \tau)$ 를 내부 유동유체가 없는 경우의 한단고정-타단자유의 경계조건을 만족시키는 고유함수(eigen-function)

$$\phi_j(\xi) = \cosh s_j \xi - \cos s_j \xi - \sigma_j (\sinh s_j \xi - \sin s_j \xi) \quad (13)$$

를 이용하여 다음과 같이 가정한다.

$$w(\xi, \tau) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j(\tau) \phi_j(\xi) \quad (14)$$

여기서, s_j 는 외판보의 j 번째 고유치(eigenvalue)이며, σ_j 는 다음과 같다.

$$\sigma_j = \frac{\sinh s_j - \sin s_j}{\cosh s_j + \cos s_j} \quad (15)$$

식 (14)로 가정된 해를 식 (8)에 대입하고 $j=1$ 부터 유한개의 항 q 까지 Galerkin 적분을 행하면 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{j=1}^q (\phi_j, \phi_i) \ddot{a}_j \\ + \sum_{j=1}^q \left\{ 2u\beta^{\frac{1}{2}} (\dot{\phi}_j, \phi_i) + \gamma (\phi_j^{(iv)}, \phi_i) + \nu (\phi_j, \phi_i) \right\} \dot{a}_j \\ + \sum_{j=1}^q \left\{ u^2 (\phi_j'', \phi_i) + \varphi (\dot{\phi}_j, \phi_i) - \varphi (\phi_j'', \phi_i) \right. \\ + \varphi (\xi \phi_j'', \phi_i) + (\phi_j^{(iv)}, \phi_i) \\ \left. - (\bar{M} \{1 - H(\xi - \xi_1)\} \phi_j'', \phi_i) \right\} a_j \\ + \sum_{j=1}^q \{ (\alpha \delta(\xi - \xi_1) \phi_j, \phi_i) \} \ddot{a}_j = 0 \quad (16)$$

여기서, a_j 위의 점($\dot{\cdot}$)은 τ 에 대한 미분을 나타내고,

(ϕ_j, ϕ_i) 는 $\int_0^1 \phi_j \phi_i d\xi$ 를 의미한다.

식 (16)을 행렬형태의 식으로 정리하면

$$[A] \{\ddot{a}\} + [B] \{\dot{a}\} + [C] \{a\} = \{0\} \quad (17)$$

과 같고, 각 행렬들 $[A], [B], [C]$ 의 성분은 다음과 같다.

$$A_{ij} = \delta_{ij} + \alpha \phi_i(\xi_1) \phi_j(\xi_1) \quad (18)$$

$$B_{ij} = (s_j^4 \gamma + \nu) \delta_{ij} + 2u\beta^{\frac{1}{2}} \int_0^1 \phi_i \phi_j' d\xi \quad (19)$$

$$C_{ij} = s_j^4 \delta_{ij} + \varphi \int_0^1 \phi_i \phi_j' d\xi + (u^2 - \varphi) \int_0^1 \phi_i \phi_j'' d\xi + \varphi \int_0^1 \xi \phi_i \phi_j'' d\xi - \overline{M} \int_0^{\xi_1} \phi_i \phi_j'' d\xi \quad (20)$$

식 (17)은 고유치 문제를 풀기위하여

$$\{\dot{Z}\} = [P] \{Z\} \quad (21)$$

로 변환되며, 여기서,

$$\{Z\} = \begin{pmatrix} \dot{a} \\ a \end{pmatrix}, [P] = \begin{bmatrix} -[V] & -[W] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[V] = [A]^{-1} [B], [W] = [A]^{-1} [C]$$

이고, $[I]$ 는 단위행렬을 나타낸다.

이제 식 (21)의 해의 거동은 고유치 λ_i 에 의해 지배되며 일반적으로 감쇠가 존재하는 경우의 λ_i 는 다음과 같이 복소수 형태로 표현된다.

$$\lambda_i = \alpha_i \pm i\omega_i \quad (23)$$

2.2 안정성 해석

파이프의 동적안정성은 식 (23)의 고유치 λ_i 의 실수부분(real part)인 α_i 의 부호에 의해 결정된다.

$\alpha_i < 0$ 이면, 송수관은 안정하게 되고, $\alpha_i > 0$ 이면 불안정이 되는데, 이 경우 $\omega_i \neq 0$ 일때는 플러터 형태의 불안정, $\omega_i = 0$ 일때는 발산형태의 불안정으로 된다.

2.3 파이프의 진동억제

외란에 의해 파이프가 진동하는 경우 내부 유동유체에 의한 파이프의 제어방법을 직관적으로 이해하기 위하여 Fig. 2와 같이 유체가 파이프에 대해서 하는 일 W 를 생각하자.

Fig. 2는 한단고정-타단자유 경계조건을 갖는 파이프의 자유단을 확대하여 나타낸 그림이며, 여기서 \vec{B} 를 파이프

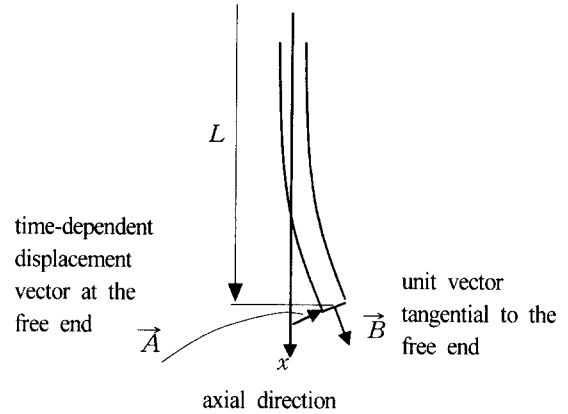


Fig. 2 Free end of a vertically cantilevered pipe conveying fluid.

의 자유단에 접선방향으로의 단위벡터, \vec{A} 를 자유단에서의 변위벡터라 하면 일 W 에 대한 식은 다음과 같이 나타내질 수 있다.

$$W = \int -m_f U \left\{ \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)^2 + U (\vec{B}) \cdot \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \right\} dt \quad (24)$$

식 (24)에서 유속 U 가 클 때 \vec{B} 와 $(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t})$ 가 충분히

상위(out of phase)가 되어 스칼라 곱 $(\vec{B}) \cdot (-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t})$ 이 음의 값이 된다면 에너지 W 는 양(positive)의 값이 되고 진동은 커지게 될 것이다. 그러나, 유속 U 가 작은 경우, 식 (24)의 첫째 항이 지배적이 되며 따라서 에너지 W 는 음(negative)의 값이 되어 파이프가 유체에 대해 일을 하게 된다. 즉, 유체는 파이프로부터 에너지를 방출하게 되어 계는 안정화됨을 의미한다.

3. 수치해석 결과 및 검토

임의의 위치에 부가질량을 갖고 내부 유동유체의 유속변화에 따른 파이프의 동적 안정성에 대한 수치해는 Galerkin 방법에 의한 10항 근사해에 의해 결과를 얻었으며, 이 결과는 부가질량이 없는 경우인 참고문헌 (13)의 결과와 비교하여 근사한 일치성을 보임으로써 본 논문의 수치해의 타당성을 검토하였다.

Fig. 3은 부가질량이 없는 경우로서 무차원화된 유속값이 $u=0$ 부터 $u=10$ 까지 변화할 때, 처음 저차 3개의 고유치(first three lowest eigenvalues)변화를 나타낸 그림으로, 파이프의 불안정은 2차 모드(second mode)에 의해 발생되

며 안정과 불안정을 경계짓는 무차원 임계유속값은 $u_{cr} = 7.38$ 로 나타남을 알 수 있었다.

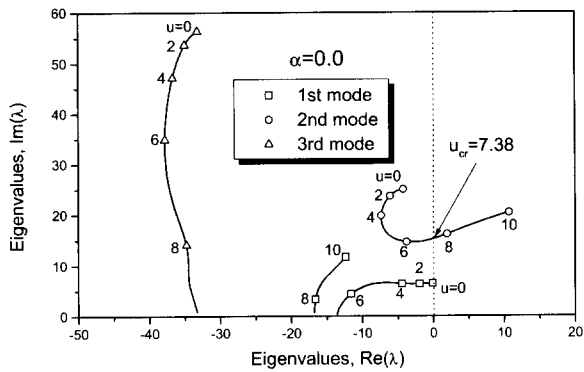


Fig. 3 Eigenvalue curves without attached mass ($\alpha=0.0$)

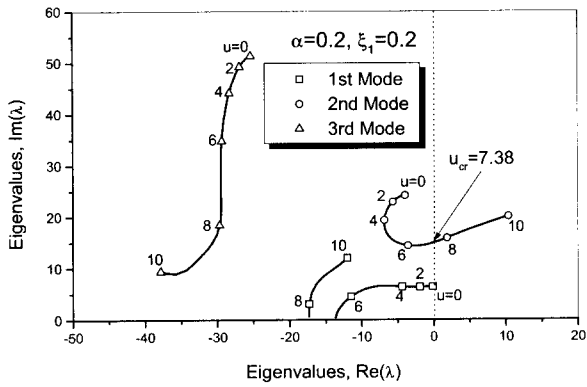


Fig. 4 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.2, \xi_1=0.2$)

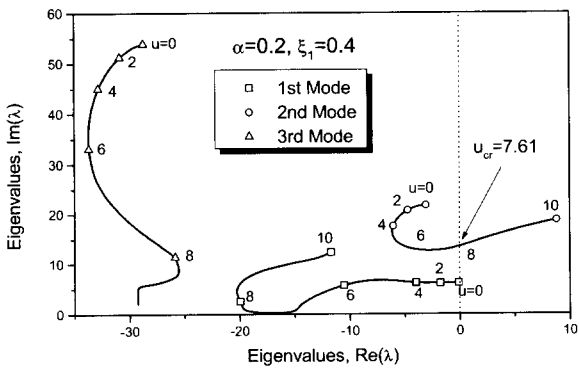


Fig. 5 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.2, \xi_1=0.4$)

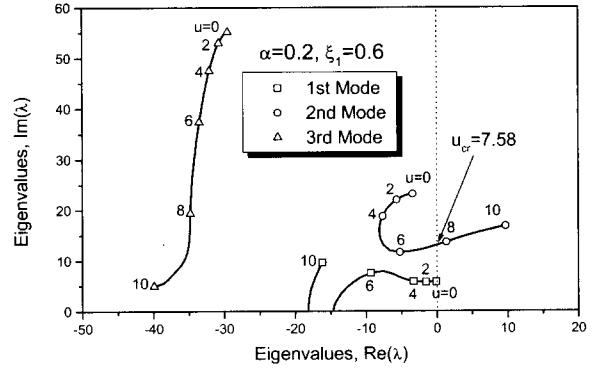


Fig. 6 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.2, \xi_1=0.6$)

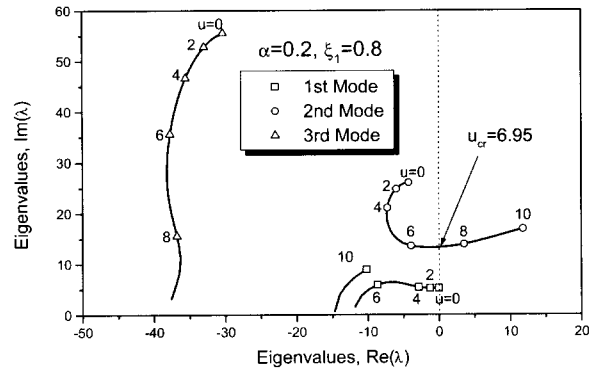


Fig. 7 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.2, \xi_1=0.8$)

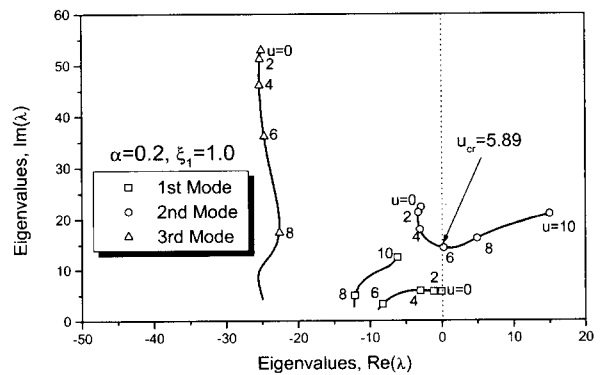


Fig. 8 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.2, \xi_1=1.0$)

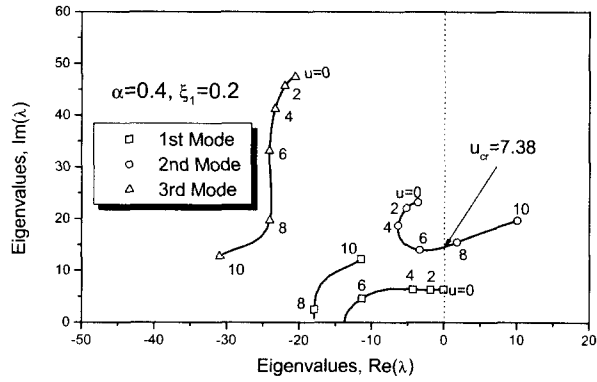


Fig. 9 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.4, \xi_1=0.2$)

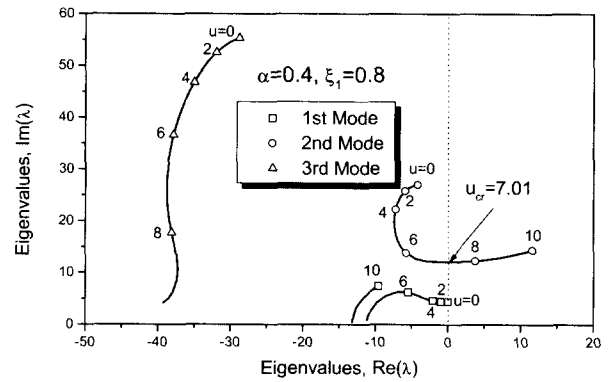


Fig. 12 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.4, \xi_1=0.8$)

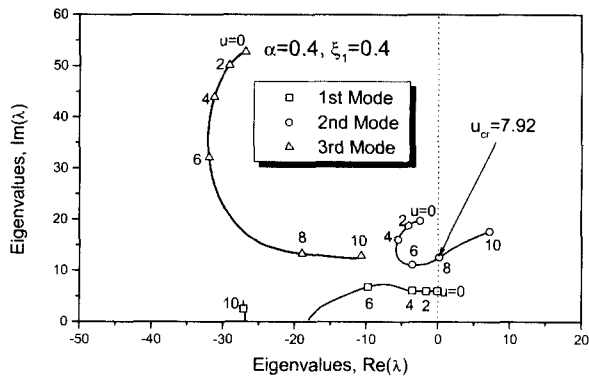


Fig. 10 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.4, \xi_1=0.4$)

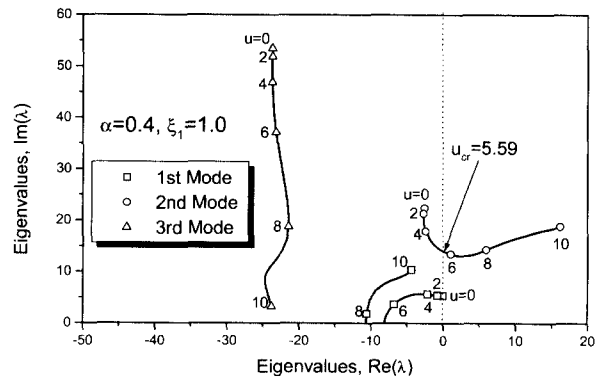


Fig. 13 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.4, \xi_1=1.0$)

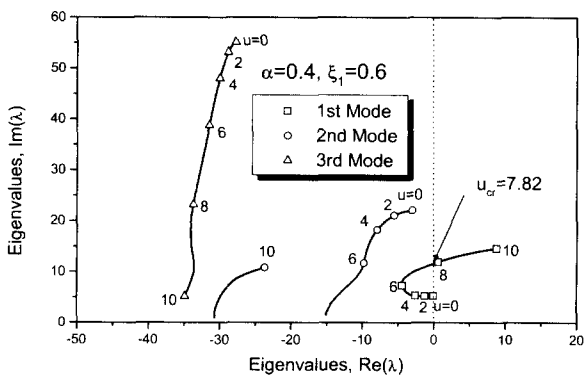


Fig. 11 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=0.4, \xi_1=0.6$)

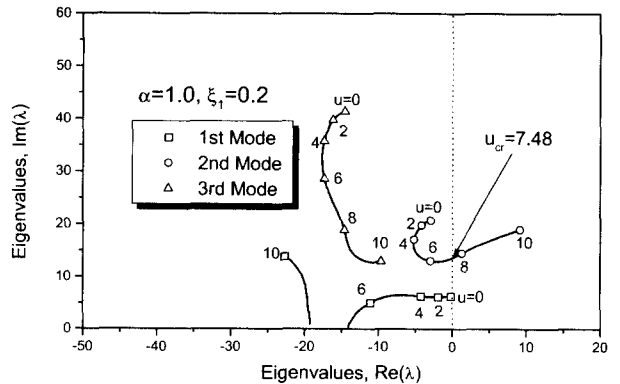


Fig. 14 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha=1.0, \xi_1=0.2$)

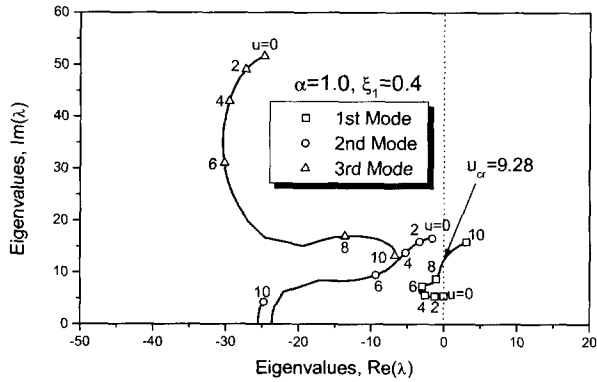


Fig. 15 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha = 1.0, \xi_1 = 0.4$)

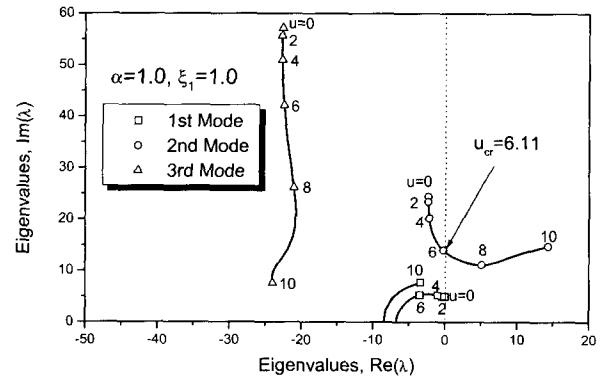


Fig. 18 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha = 1.0, \xi_1 = 1.0$)

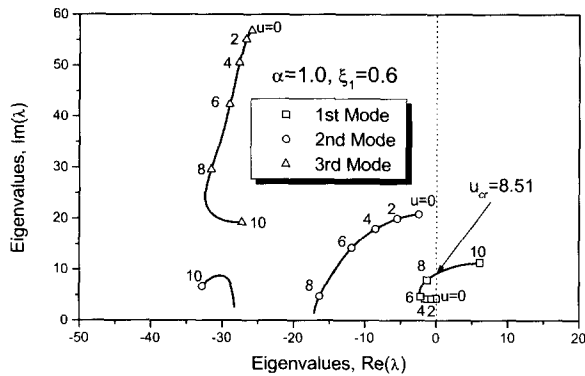


Fig. 16 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha = 1.0, \xi_1 = 0.6$)

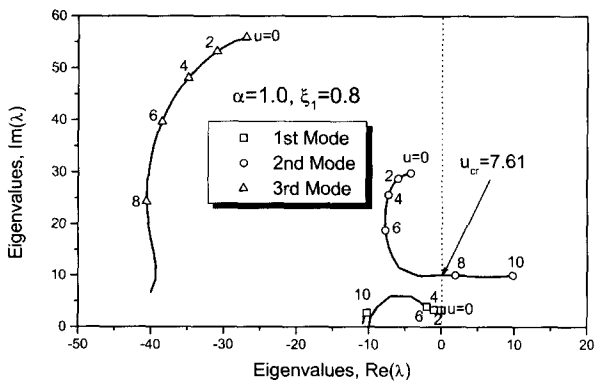


Fig. 17 Eigenvalue curves with attached mass ($\alpha = 1.0, \xi_1 = 0.8$)

Fig. 4부터 Fig. 8까지는 부가질량과 파이프질량의 질량비 α 가 $\alpha=0.2$ 일때 부가질량의 위치 ξ_1 이 $\xi_1 = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 에 대한 고유치의 변화를 보여준다. 이 경우 부가질량의 위치 $\xi_1 = 0.2$ 일때는 $u_{cr} = 7.38$, $\xi_1 = 0.4$ 일때는 $u_{cr} = 7.61$, $\xi_1 = 1.0$ 일때는 $u_{cr} = 5.89$ 로 나타났으며, $\xi_1 = 0.4$ 부근에서 최대 임계유속값을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 부가질량의 위치가 고정단으로부터 자유단으로 이동됨에 따라 임계유속값이 $\xi_1 = 0.4$ 부근까지 증가했다 감소되는 현상이 나타난다.

Fig. 9부터 Fig. 13까지는 질량비 $\alpha = 0.4$, Fig. 14부터 Fig. 18까지는 $\alpha = 1.0$ 에 대한 그림들이다. 어떤 고정된 질량비 α 에 대해서도 $\xi_1 = 0.4$ 부근에서 임계유속이 최대임을 알 수 있었으며, $\xi_1 = 0.4$ 이상에서는 부가질량 위치가 자유단 쪽으로 갈수록 임계유속값이 감소됨을 알 수 있었다.

한편, 고정된 부가질량의 위치에서 질량비 α 의 증가에 따른 임계유속의 변화를 보면 $\xi_1 = 0.2 \sim 0.6$ 까지는 질량비 α 가 증가함에 따라 임계유속값이 증가되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 $\xi_1 = 0.8$ 과 1.0 에서는 질량비 α 의 증가에 따라 임계유속값이 감소했다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, Fig. 11, 15, 16에서는 1차모드에 의해 불안정이 일어나는데 이는 부가질량의 위치 $\xi_1 = 0.4, 0.6$ 들로서 외팔보의 2차, 3차 모드의 절점(nodal point)부호들과 관계된 때문으로 판단된다.

Table 1은 부가질량이 없는 경우($\alpha = 0.0$)와 부가질량이 존재하는 경우에 있어서, 질량비 α 와 부가질량의 위치 ξ_1 의 변화에 따른 수치해석상의 무차원 임계유속값 u_{cr} 를 나타내는 표로 이 표속에는 Fig. 3부터 18까지의 내용도 포함하고 있다.

Table 1 Dimensionless critical fluid velocity, u_{cr} , depending on the mass ratios and the position of the attached mass

Position ξ_1 \ Mass ratio α	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.2	7.38	7.38	7.38	7.40	7.44	7.48
0.4	7.38	7.61	7.92	8.29	8.73	9.28
0.6	7.38	7.58	7.82	8.06	8.28	8.51
0.8	7.38	6.95	7.01	7.18	7.39	7.61
1.0	7.38	5.89	5.59	5.68	5.88	6.11

4. 실험장치 및 실험

4.1. 실험장치

Fig. 19는 내부 유체유동이 있고 부가질량을 갖는 유연한 파이프의 동적안정성 실험과 외란이 있는 경우 이를 내부 유동유체에 의해 제어할 목적으로 실험장치를 나타낸다.

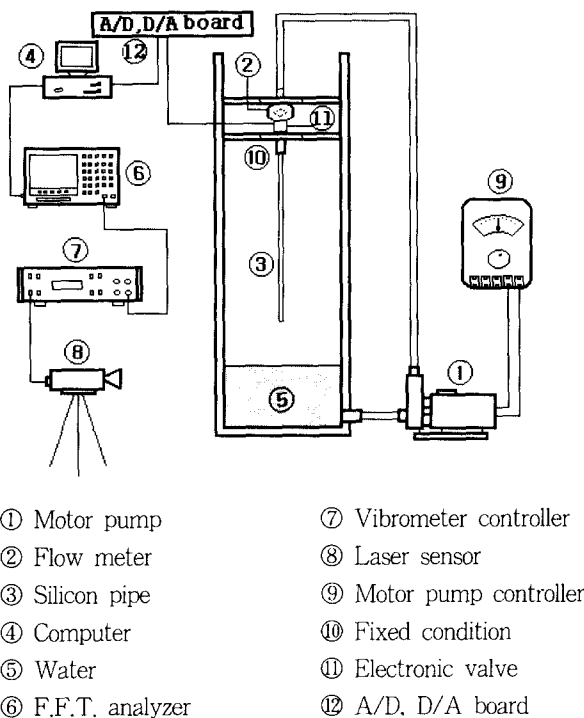


Fig. 19 Schematic diagram for experimental setup of the pipe conveying fluid

4.2 실험

(1) 파이프의 동적안정성 실험

수치해석에서 얻은 파이프의 임계유속값에 대한 타당성 검토를 위하여 파이프의 동적 안정성 실험을 행하였으며, 실험의 순서는 다음과 같다.

첫째, Fig. 19에서 보여지는 모터펌프에 의해 끌어올려진 물은 디지털 유량계를 거쳐 수직으로 매달린 실리콘 파이프 내부를 흐르게 된다. 이때 유속이 느린 경우는 파이프는 안정한 상태를 유지하게 된다. 둘째, 모터 펌프의 회전수를 증가시켜 유속을 변화시키면서 실제 어떤 유속값에서 플러터 불안정이 일어나는지를 조사하였다. 셋째, 부가질량이 없는 경우와 존재하는 경우에 대해, 파이프의 불안정이 어떤 유속값에서 발생되는지를 조사하였으며, 특히 부가질량이 존재하는 경우는 부가질량의 위치와 크기변화가 임계유속값의 변화에 어떤 영향을 미치는가도 살펴보았다.

수치시뮬레이션을 통하여 예측된 파이프의 임계유속값에 대한 실험적 검증을 위해, 부가질량이 없는 경우 ($\alpha=0.0$)와 부가질량이 존재하는 두 가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 또한, 부가질량이 존재하는 경우는 부가질량의 크기가 $\alpha=0.2$, 즉, $M=19(g)$ 인 경우와 $\alpha=0.4$, 즉, $M=38(g)$ 인 두 경우에 대하여 부가질량의 위치 ξ_1 이 각각 $\xi_1=0.2$ 와 0.4 일때에 대하여 수행하였다.

수치해석과 실험에 사용된 파이프와 부가질량의 제원은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 3은 부가질량이 없는 경우와 부가질량이 존재하는 경우에 대한 실제 임계유속값을 이론적 예측값과 실험값의 비교를 나타낸 표이다.

Table 3을 통해, 본 논문의 수치 시뮬레이션을 통한 이론적 임계유속 예측값이 부가질량이 없는 경우에는 실험값과 근사하게 일치하고 있음을 알 수 있었으나, 부가질량이

Table 2 Details of the pipe and the attached mass

	Materials	Silicon rubber
Pipe	Length L	545(mm)
	Outer diameter d_o	13.5(mm)
	Inner diameter d_i	6.7(mm)
	Young's modulus E	9.72(MPa)
	Viscous damping coefficient E^*	1.723×10^5 ($N \cdot sec/m^2$)
	Pipe mass per unit length m_p	0.139 (kg/m)
	Attached mass	Type A
Type B		38(g)

Table 3 Comparison theoretical results with experimental ones for critical fluid velocity, U_{cr}

Position ξ_1		Mass ratio α	0.0	0.2	0.4
0.2	Theory (m/s)		8,806	8,806	8,806
	Experiment (m/s)		8,641	8,589	8,641
0.4	Theory (m/s)		8,806	9,080	9,450
	Experiment (m/s)		8,641	8,903	9,218

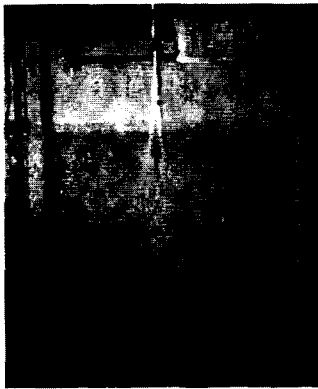


Fig. 20 Photograph of flutter motion

존재하는 경우에는 그렇지 않은 경우보다는 약간의 오차를 더 보이고 있음을 알 수 있었다. 그 원인은 수치해석시 부가질량의 회전관성이나, 부가질량의 무게중심으로부터 파이프의 자유단까지의 거리의 영향을 고려치 않고 단순히 부가질량의 크기만을 고려하여 수치해석상의 유속값을 얻었기 때문으로 사료되며, 또한, 모터펌프로부터 유출되는 유체는 실제로는 맥동력 형태이나 수치해석시에는 일정크기의 힘으로 가정하여 예측한 유속값인 때문으로 판단된다.

Fig. 20은 질량비 α 가 $\alpha=0.2$, $\xi_1=0.2$ 인 경우에 대한 파이프의 플러터 현상을 보여주는 사진이다.

한편, Fig. 21은 Fig. 20에 대한 플러터 진동변위를 나타낸 것으로 센싱 위치는 고정단으로부터 35 mm인 위치이다.

(2) 내부 유동유체에 의한 파이프의 제어실험

본 절에서는 외란이 존재하는 경우 파이프가 진동하게 될 때, 파이프 내부에 유동유체를 보냄으로서 파이프의 진동을 억제시키는 실험을 행하였다.

먼저 파이프에 외란이 없는 경우는 Fig. 19의 전자밸브가 off 상태로 되어있게 되고 파이프는 안정한 상태를 유지하게 된다. 그러나 파이프에 외란이 주어지게 되면 파이프는

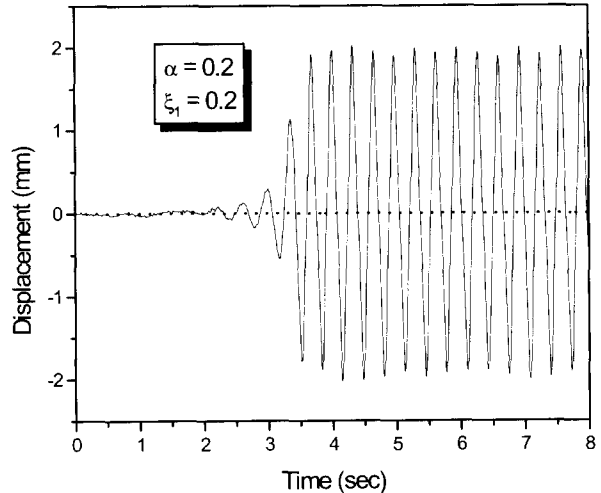


Fig. 21 Displacement curve for flutter motion

진동을 하게 되고 이 진동변위는 센서에 의해 계측된다. 이 계측된 아날로그(analog)신호는 A/D 변환기를 통해 디지털(digital)신호로 변화되며 컴퓨터는 이 디지털 신호가 어떤 상위설정값(upper threshold value) 이상이 되면 전자밸브를 on 시켜 최적 유속을 지닌 유량으로 유체를 파이프 내부로 흘려보내 파이프를 안정화시키게 된다. 한편, 이 디지털신호의 어떤 하위설정값(lower threshold value)이하에서는 전자밸브가 off 되는 on-off 조절을 하게 된다.

Fig. 22는 부가질량이 없는 경우 외부로부터의 외란이 파이프에 주어질 때 인위적인 제어가 없는 경우의 파이프의 임펄스 응답을 보여주고 있다. 이 경우 외란에 의한 진동은 구조감쇠로 인해 천천히 감쇠되지만 어느 정도 연속적이다. Fig. 23은 외란이 있는 경우 내부 유동유체를 이용하여 능동진동제어를 한 파이프의 응답을 보여주는 그림이다. 한편, Fig. 24와 Fig. 25는 각각 부가질량이 존재하는 경우 ($\alpha=0.4$, $\xi_1=1.0$)의 제어되지 않은 임펄스 응답과 제어된

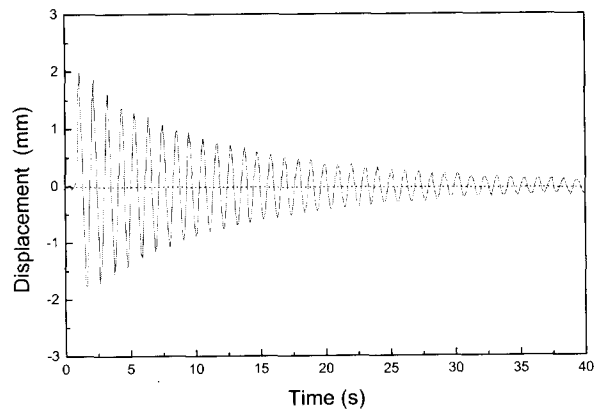


Fig. 22 Uncontrolled displacement of the pipe without attached mass. ($\alpha = 0.0$)

응답을 보여주는 그림들이다.

부가질량이 없는 경우와 존재하는 경우의 제어된 응답을

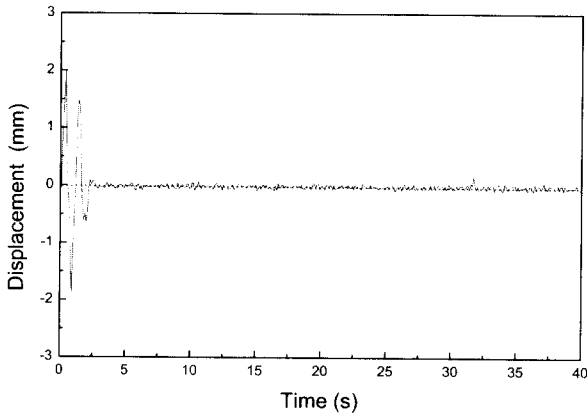


Fig. 23 Controlled displacement of the pipe without attached mass ($\alpha = 0.0$)

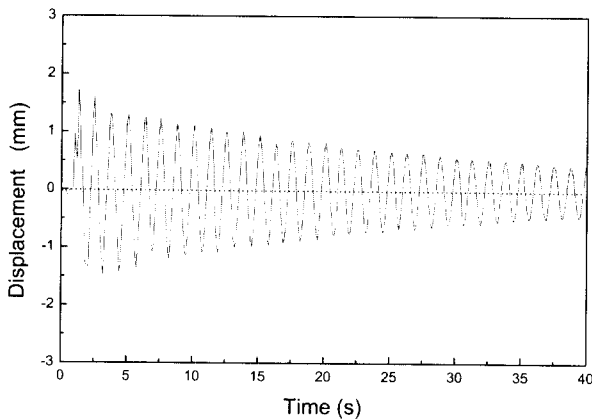


Fig. 24 Uncontrolled displacement of the pipe with attached mass ($\alpha = 0.4, \xi_1 = 1.0$)

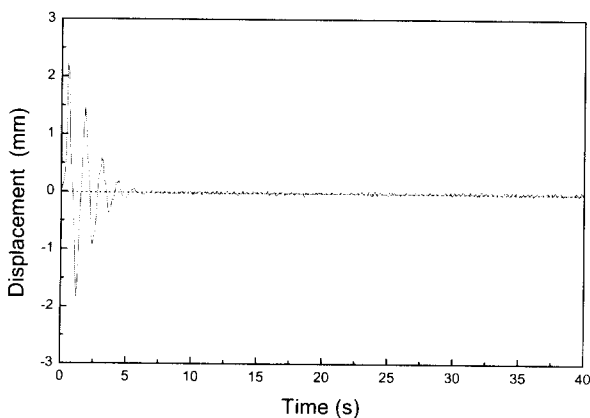


Fig. 25 Controlled displacement of the pipe with attached mass ($\alpha = 0.4, \xi_1 = 1.0$)

나타내는 Fig. 23과 Fig. 25의 비교에 있어 부가질량이 존재하는 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 파이프가 안정화 되는데 걸리는 시간이 더 길다는 것을 알 수 있는데, 이는 부가질량이 있는 경우가 고유진동수가 작음으로 인해 감쇠의 정도가 느린 것으로 판단된다.

5. 결론

임의의 위치에 부가질량을 갖고 내부 유동유체에 의한 파이프의 동적안정성에 관한 수치 및 실험적 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 임계유속값에 대한 본 논문의 수치해의 타당성이 실험을 통하여 검증되었다.

(2) 질량비 α 의 고정값에 대하여 부가질량의 위치 ξ_1 이 $\xi_1 = 0.4$ 를 중심으로, 고정단으로부터 자유단쪽으로 이동될 수록 임계유속값이 증가했다가 감소된다. 또한 최대 임계유속값은 $\xi_1 = 0.4$ 부근에서 일어난다.

(3) 부가질량의 위치 ξ_1 값이 $\xi_1 = 0.2 \sim 0.6$ 에서는 질량비 α 의 증가에 따라 임계유속값은 증가 되나, $\xi_1 = 0.8$ 과 1.0에서는 질량비 증가에 따라 임계유속값이 감소했다가 증가한다.

(4) 외란에 의한 파이프의 제어를 내부유동유체를 이용하여 제어하였으며, 이 제어방법은 무한자유도를 갖는 연속체 구조물의 제어에 있어 유체를 이용함으로써 파이프 전체에 대해 부드러운 제어를 할 수 있었고, 제어에 있어 흔히 나타나기 쉬운 spillover 현상을 피할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

후 기

본 논문은 1997년도 대전산업대학교 교내학술연구비 지원에 의한 결과이며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Ashley, H. and Haviland, G., 1950, "Bending Vibrations of a Pipeline Containing Flowing Fluid", Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 17, pp.229 ~ 232.
- (2) Feodos'ev, V. P., 1951, "Vibration and Stability of a Pipe when Liquid Flows Through It", Inzhenernyi Sbornik, Vol. 10, pp.169 ~ 170.
- (3) Housner, G. W., 1952, "Bending Vibrations of a

Pipe Line Containing Flowing Fluid", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 19, pp.205~208.

(4) Niordson, F. I., 1953, "Vibrations of a Cylindrical Tube Containing Flowing Fluid", *Kungliga Tekniska Hogskolans Handlingar*(Stockholm), No. 73.

(5) 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.

(6) Benjamin, T. B., 1961, "Dynamics of a System of Articulated Pipes Conveying Fluid (II. Experiment)", *Proceedings of the Royal Society (London), Series A*, Vol. 261, pp.487~499.

(7) Gregory, R. W. and Paidoussis, M. P., 1966, "Unstable Oscillation of Tubular Cantilevers Conveying Fluid (I. Theory)", *Proceedings of the Royal Society (London), Series A*, Vol. 293, pp.512~527.

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

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

(10) Becker, O., 1979, "Zum Stabilitätsverhalten des Durchströmten Geraden Rohres Mit Elastischer Querstützung", *Maschinenbautechnik*, Vol. 28, pp.325 ~ 327.

(11) Sugiyama, Y., Tanaka, Y., Kishi, T. and Kawagoe, H., 1985, "Effect of a Spring Support on the Stability of Pipes Conveying Fluid", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 100, pp.257 ~270.

(12) Sugiyama, Y., Kawagoe, H., Kishi, T. and Nishiyama, S., 1988, "Studies on the Stability of Pipes Conveying Fluid (The Combined Effect of a Spring Support and a Lumped Mass)", *JSME International Journal, Series 1*, Vol. 31, pp.20~26.

(13) Sugiyama, Y., Katayama, T., Kanki, E., Nishino, K. and Åkesson, B., 1992, "Active Flutter Suppression of a Vertical Pipe Conveying Fluid", *Proceedings 3rd International Symposium on Fluid-Induced Vibration and Noise*, Vol. 8, pp.76~86.

(14) Sugiyama, Y., Katayama, T., Kanki, E., Chiba, M., Shiraki, K. and Fujita, K., 1996, "Stability of Vertical Fluid Conveying Pipes having the Lower End Immersed in Fluid", *JSME International Journal, Series B*, Vol. 39, pp.57~65.