

< 논 문 >

유체유동을 갖는 외팔 송수관의 동적 안정성과 진동제어에 관한 연구

A Study on the Dynamic Stability and Vibration Control of Cantilevered Pipes Conveying Fluid

류 봉 조* · 정 승 호** · 강 용 철***

Bong-Jo Ryu, Seong-Ho Jung and Yong-Chul Kang

(1997년 10월 14일 접수 ; 1997년 12월 30일 심사완료)

Key Words : Vibration Suppression(진동억제), Internal Flowing Fluid (내부유동유체), Elastic Pipe(유연 송수관), Dynamic Stability (동적 안정성)

ABSTRACT

The present paper deals with the dynamic stability and vibration suppression of a cantilevered flexible pipe having a tip mass under an internal flowing fluid. The equations of motion are derived by energy expressions using extended Hamilton's principle, and some analytical results using Galerkin's method are presented. Finally, the vibration suppression technique by means of an internal fluid flow is demonstrated experimentally.

1. 서 론

송수관의 불안정 현상이란 송수관내를 흐르는 유체의 속도가 어떤 임계 값에 달하면 송수관이 좌굴하기도 하고 진동이 발생하여 큰 진폭의 진동으로 성장하는 것과 같은 현상이다. 이러한 현상은 오래전부터 이미 잘 알려진 현상임에도 불구하고 이에 대한 연구의 역사는 그리 오래되지 않았다.

유동유체에 의한 송수관 연구의 시초는 1950년 Ashley와 Haviland⁽¹⁾에 의해 Trans-Arabian 송유관에서 관찰된 진동 현상을 규명하려는 시도에서 비롯된다. 그후 Feodos'ev⁽²⁾는 양단이 단순지지된 송수관의 선형 운동방정식을 유도하였는데 아주 단

순한 수식형태였다. Benjamin^(3,4)은 2자유도를 갖는 분절된 송수관(articulated pipe)의 동역학에 대한 이론적 연구와 실험적 연구를 병행하였다. 그는 이 연구를 통해, 송수관이 양단 단순지지된 경우는 유동유체의 힘은 보존적(conservative)이고, 계는 어떤 임계유속 이상에서 발산형(divergence) 불안정을 일으키지만, 유체가 나오는 유출끝단이 자유인 경우는 유동유체의 힘이 비보존적(nonconservative)이고, 계는 어떤 임계유속 이상에서 플러터(flutter) 불안정을 일으킨다는 것을 제시하였다. Benjamin의 이러한 유한 자유도계에서의 일반이론은 연속계(continuous system)에도 확장되는 것으로서 Gregory와 Paidoussis^(5,6)는 한단이 고정되고 타단이 자유인 무한 자유도를 갖는 송수관의 불안정 문제를 연구하였다. 이러한 역학계에서는 어떤 임계유속 이상에서 플러터 불안정 현상을 손쉽게 실현해 볼 수 있다. 한편, 위의 외팔 송수관에 있어서 자유단쪽에 손가락을 접촉하면 그 순간 송수관의 자유단은 단순

* 정회원, 대전산업대학교 기계설계공학과

** 정회원, 한국원자력연구소

*** 대전산업대학교 대학원

지지단이 되어, 안정한 유속에서도 계는 발산형 불안정이 된다. Chen⁽⁷⁾은 양단이 단순지지된 송수관에 시간 종속적(time-dependent)인 유속이 주어지는 경우에 있어서 송수관의 파라메타 불안정(parametric instability)에 대한 연구를 하였다. 그러나 그가 세운 운동방정식에는 축방향 가속도 항이 고려되지는 않았다.

이상의 연구들과 함께 탄성지지된 송수관, 감쇠기를 부착한 송수관, 집중질량이 부착된 송수관에 있어 스프링의 위치변화와 스프링 상수의 변화, 집중질량 및 감쇠의 변화가 송수관의 동적 안정성에 미치는 영향 등에 대한 연구들이 이루어져 왔다. Sugiyama와 그의 공동연구자들⁽⁸⁾은 집중질량을 갖고 탄성 스프링에 의해 지지된 외팔 수평 송수관의 내부에 유체가 흐르는 경우 스프링과 집중질량의 복합효과가 계의 동적 안정성에 어떤 영향을 미치는가를 실험과 수치해석적 방법으로 연구하였다.

위의 연구들은 대부분 내부에 유체가 흐르는 송수관의 동적 안정성과 불안정에 대한 수치해석 및 실험적 연구들로서, 진동 및 좌굴현상이 송수관의 경계조건이나 송수관에 부착된 스프링의 위치에 따라 지배적이라는 것이 입증되었고, 최근 이러한 송수관의 불안정 현상을 규명하고 진동을 억제시키는 송수관 제어연구도 병행되어져 왔다. Tani와 Sudani⁽⁹⁾는 수평 외팔 송수관내를 흐르는 유체에 의해 유발되는 진동을 억제시키는 방법으로 D.C. 모터를 사용한 tendon 구조를 사용하였다. 이때 성능 함수(performance index)의 weighting을 2가지 경우로 변화시켜 이들중 reg=800인 경우가 좀더 빨리 제어가 됨을 수치해석 및 실험적으로 연구하였다. 최근 Sugiyama와 그의 공동연구자들⁽¹⁰⁾은 내부 유동유체에 의한 외팔 유연 구조물의 안정화 방법을 수치해석과 실험을 통하여 연구하였는데, 이들은 구조물의 진동을 유발하는 임계유속에서의 송수관의 불안정 현상을 실험적으로 비교하지는 못하였으며, 진동을 억제하는데 있어서도 최적 유속값을 이용한 것이 아니고 임계유속이하의 어떤 유속값으로 유량을 조절하여 송수관을 제어시켰다.

따라서, 본 연구에서는 말단질량이 없는 Sugiyama의 모델을 확장시켜, 말단질량을 갖고 내부 유체유동이 있는 송수관에 대해, 유체의 유속변화에 따른 송수관의 동적 안정성을 Galerkin방법을 이용한 수치해석적 방법과 실험적 방법에 의해 연구하고, 외부의 외란(disturbance)에 의한 송수관의 진동을 내부 유동유체의 최대안정유속(optimum stabilizing fluid velocity)에 의해 억제시키려고 한다.

2. 이론 해석

2.1 수학적 모델

내부 유동유체가 흐르는 외팔 수직 송수관의 동적 안정성과 진동제어에 관한 연구를 위해 Fig. 1과 같은 수학적 모델을 선정하였으며, Fig. 1에서 L 은 송수관의 전체길이, U 는 송수관 내부를 흐르는 유체의 유속을 나타낸다. 또한, x 와 Y 는 각각 송수관의 축방향과 횡방향 좌표를 나타내고, $y(x, t)$ 는 송수관의 횡방향 변위를 나타낸다.

2.2 지배방정식과 경계조건

Fig. 1에 보인 수학적 모델에 대해 운동방정식을 유도하기 위하여 에너지 표현식을 이용한다.

첫째, 송수관, 유체 및 말단질량에 의한 운동에너지는 다음과 같다.

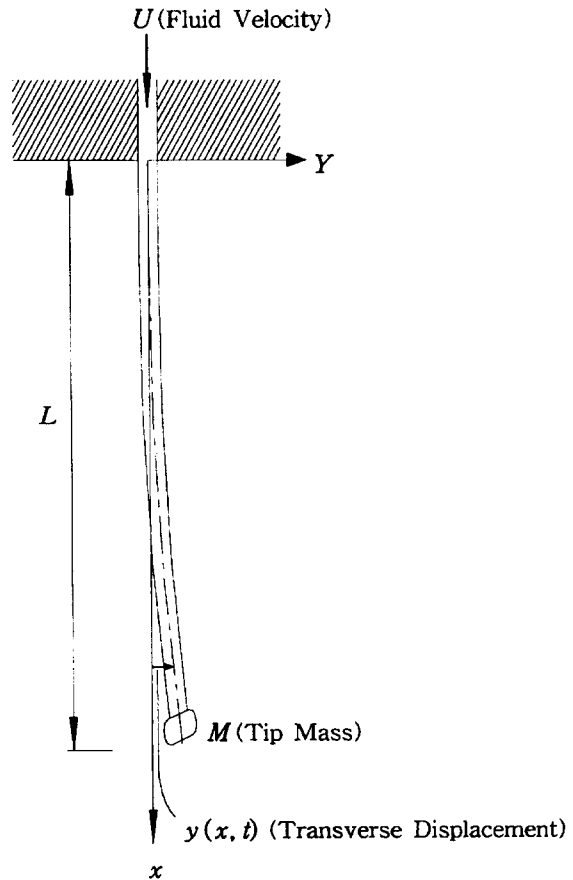


Fig. 1 Mathematical model of a vertical cantilevered pipe conveying fluid

$$T = \int_0^L \frac{1}{2} m_p \dot{y}^2 dx + \int_0^L \frac{1}{2} m_f (U^2 + 2U\dot{y}' + \dot{y}'^2) dx + \frac{1}{2} M\dot{y}(L)^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 m_f 와 m_p 는 각각 유체와 송수관의 단위길이당 질량을 나타낸다. 또한, (')와 (·)는 각각 좌표 x 와 시간 t 에 대한 미분을 나타낸다.

둘째, 송수관의 탄성 포텐셜에너지와 유체, 송수관 및 말단질량의 중력에 의한 포텐셜에너지는 다음과 같다.

$$V = \int_0^L \frac{1}{2} EI(y'')^2 dx + \int_0^L \frac{1}{2} mg(L-x)(y')^2 dx + \frac{1}{2} Mg \int_0^L y'^2 dx \quad (2)$$

식 (2)에서 E 는 송수관의 탄성계수, I 는 단면의 2차모멘트, g 는 중력가속도, m 은 송수관과 유체의 단위길이당 질량의 합을 나타낸다. 즉, $m = m_f + m_p$ 이다.

셋째, 송수관의 내부감쇠에 의한 가상일은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\delta W_{ncd} = - \int_0^L E^* I y'' \delta y'' dx \quad (3)$$

여기서, E^* 는 송수관의 점성감쇠계수를 의미한다.

네째, 송수관의 자유단 ($x=L$)에서 유속 U 에 의해 분사되는 분사력에 의한 가상일은 다음과 같다.

$$\delta W = -m_f U (\dot{y} + U\dot{y}') \delta y|_{x=L} + m_f U^2 \int_0^L y' \delta y' dx \quad (4)$$

다섯째 외부의 점성감쇠에 의한 가상일은 다음과 같다.

$$\delta W_o = - \int_0^L C \dot{y} \delta y dx \quad (5)$$

여기서 C 는 외부 점성 감쇠 계수이다.

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

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V + W_c) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{NC} dt = 0 \quad (6)$$

에 대입하고 변분을 정리하면 식 (7)과 같은 운동방정식과 식 (8)부터 식 (11)까지의 경계조건이 얻어진다.

식 (6)에서 δW_c 는 식 (4)의 첫번째항을 의미하고, δW_{NC} 는 식 (3)의 $\delta W_{nc,d}$, 식 (4)의 둘째항 및 식 (5)의 합을 의미한다.

$$EIy^{iv} + E^* I y^{iv} + C\dot{y} - Mgy'' + m_p \ddot{y} + m_p (\ddot{y} + 2U\dot{y}' + U^2 y'') + mg(y' - (L-x)y'') = 0 \quad (7)$$

$$EIy''' + E^* I y''' - M\dot{y} - Mgy' = 0, \quad \text{at } x=L \quad (8)$$

$$EIy'' + E^* I y'' = 0, \quad \text{at } x=L \quad (9)$$

$$y=0, \quad \text{at } x=0 \quad (10)$$

$$y'=0, \quad \text{at } x=0 \quad (11)$$

이제 계산상의 편리를 위해 다음과 같은 무차원화된 좌표들과 변수들

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \eta = \frac{y}{L} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{m_f}{m}, \quad u = UL \sqrt{\frac{m_f}{EI}}, \quad \phi = \frac{mgL^3}{EI},$$

$$\gamma = \frac{E^*}{EL^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \nu = \frac{CL^2}{\sqrt{mEI}}, \quad \bar{M} = \frac{MgL^2}{EI}, \quad (13)$$

$$M^* = \frac{M}{mL}$$

을 이용하여 운동방정식과 경계조건을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau^2} + 2u\beta^{\frac{1}{2}} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \tau \partial \xi} + u^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} + \phi \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial \xi} - (1-\xi) \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} \right\} + \frac{\partial^4 \eta}{\partial \xi^4} + \gamma \frac{\partial^5 \eta}{\partial \xi^4 \partial \tau} + \nu \frac{\partial \eta}{\partial \tau} - \bar{M} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} = 0 \quad (14)$$

$$\eta(0, \tau) = 0, \quad \frac{\partial \eta(0, \tau)}{\partial \xi} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial^3 \eta(1, \tau)}{\partial \xi^3} + \gamma \frac{\partial^4 \eta(1, \tau)}{\partial \tau \partial \xi^3} - M^* \frac{\partial^2 \eta(1, \tau)}{\partial \tau^2} - \bar{M} \frac{\partial \eta(1, \tau)}{\partial \xi} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \eta(1, \tau)}{\partial \xi^2} + \gamma \frac{\partial^3 \eta(1, \tau)}{\partial \tau \partial \xi^2} = 0 \quad (17)$$

식 (13)의 무차원 변수들 중에서, β 는 유체의 질량과 유체와 송수관의 질량비, u 는 유속, ϕ 는 유체와 송수관에 의한 중력변수, γ 는 송수관의 내부감쇠, C 는 외부감쇠, \bar{M} 와 M^* 는 각각 말단

질량의 증력변수와 말단질량의 질량비를 나타낸다.

식 (14)의 무차원화된 운동방정식의 해 $\eta(\xi, \tau)$ 를 유체가 없는 경우 경계조건을 만족시키는 외팔 보의 자유 진동에 대한 고유함수(eigen-function) $\phi_j(\xi)$ 를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta(\xi, \tau) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j(\tau)\phi_j(\xi) \quad (18)$$

여기서, $\phi_j(\xi) = \cosh s_j \xi - \cos s_j \xi - \sigma_j(\sinh s_j \xi - \sin s_j \xi)$ 이고, s_j 는 외팔보의 자유진동의 j 번째 고유치(eigenvalue)이며, σ_j 는 다음과 같다.

$$\sigma_j = \frac{\cosh s_j + \cos s_j}{\sinh s_j - \sin s_j} \quad (19)$$

이제 식 (18)을 식 (14)에 대입하고 $j=1$ 부터 유한개 q 항까지 Galerkin 적분을 행하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^q (\phi_j, \phi_i) \ddot{a}_j + \sum_{j=1}^q \left\{ 2u\beta^{\frac{1}{2}} (\phi_j, \phi_i) \right. \\ & + \gamma (\phi_j^{iv}, \phi_i) + \nu (\phi_j, \phi_i) \dot{a}_j \\ & + \sum_{j=1}^q \{ u^2 (\phi_j'', \phi_i) + \psi (\phi_j', \phi_i) \\ & - \psi (\phi_j'', \phi_i) + \psi (\xi \phi_j'', \phi_i) + (\phi_j^{iv}, \phi_i) \\ & \left. - M (\phi_j'', \phi_i) \} a_j + \sum_{j=1}^q \overline{M} \phi_j'(1) \right. \\ & \left. \phi_j(1) + \sum_{j=1}^q M^* \phi_j(1) \phi_j(1) \right\} \ddot{a}_j = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, a_j 위의 점 (\cdot)은 무차원화된 시간 τ 에 대한 미분을 나타내고, (ϕ_j, ϕ_i) 는 $\int_0^1 \phi_j \phi_i d\xi$ 를 나타낸다.

식 (20)은 다음과 같은 행렬형태의 단순한 형태로 귀결된다.

$$[A] \{ \ddot{a} \} + [B] \{ \dot{a} \} + [C] \{ a \} = \{ 0 \} \quad (21)$$

식 (21)에서 각 행렬의 요소는 다음과 같다.

$$a_{ij} = \delta_{ij} + M^* \phi_j(1) \phi_i(1) \quad (22)$$

$$b_{ij} = (s_j^4 \gamma + \nu) \delta_{ij} + 2u\beta^{\frac{1}{2}} \int_0^1 \phi_j \phi_i d\xi \quad (23)$$

$$\begin{aligned} c_{ij} = & s_j^4 \delta_{ij} + \psi \int_0^1 \phi_j \phi_i d\xi + (u^2 - \psi) \int_0^1 \phi_j \phi_i d\xi \\ & + \psi \int_0^1 \xi \phi_j \phi_i d\xi - \overline{M} \int_0^1 \phi_j \phi_i d\xi + \overline{M} \phi_j(1) \phi_i(1) \end{aligned} \quad (24)$$

식 (21)은 고유치 문제를 해결하기 위해 다음과

같은 식으로 변환된다.

$$\{ \dot{Z} \} = [P] \{ Z \} \quad (25)$$

여기서,

$$\{ Z \} = \begin{Bmatrix} \dot{a} \\ a \end{Bmatrix}, \quad [P] = \begin{bmatrix} -[V] & -[W] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$[V] = [A]^{-1}[B], \quad [W] = [A]^{-1}[C] \quad (27)$$

이며, $[I]$ 는 단위행렬을 나타낸다.

이제 식 (25)의 해의 거동은 고유치 λ_i 에 의해 지배되며, 일반적으로 고유치 λ_i 는 감쇠가 있는 경우 복소수의 형태로 표시된다.

$$\lambda_i = \alpha_i \pm i\omega_i \quad (28)$$

2.3 안정성 해석

송수관의 안정성 해석은 이 고유치 λ_i 의 실수부분(real part)인 α_i 의 부호에 의하여 결정된다. 즉, $\alpha_i > 0$ 일때 송수관은 불안정하게 되고, $\alpha_i < 0$ 인 경우는 안정하게 된다. 그러므로 $\alpha_i = 0$ 일때는 안정과 불안정의 경계가 되는 임계 값이며 이때의 유속값을 임계유속(critical fluid velocity)값으로 규정한다. 또한, $\alpha_i < 0$ 이면서 α_i 의 절대값이 최대가 될때의 유속값은 최적 안정유속(optimum stabilizing fluid velocity)이라 하고 송수관은 이 속도에서 최대로 빨리 안정화될 수 있다.

3. 수치해석 결과 및 검토

본 연구에서는 이론해석에서 유도된 고유치 문제의 방정식으로부터 수치해석을 행하였으며, 수치해석은 Galerkin의 모드함 방법을 이용하여 11항까지 고려한 해를 얻었다. 해의 정밀도를 검증하기 위해 말단질량의 효과를 고려하지 않은 참고문헌(10)의 조건에서의 결과와 비교하여 임계유속에 있어서 0.039%의 오차를 얻었다. 수치해석에 사용된 송수관의 제원과 말단질량의 제원은 Table 1과 Table 2에 나타난 바와 같다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 본 연구의 시험편으로 선택한 외경 $d_0=13.5$ (mm), 내경 $d_i=6.7$ (mm)의 송수관에 있어서 송수관과 유체의 증력을 고려하지 않은 경우와 증력을 고려한 경우에 대한 고유치 변화를 무차원 유속 u 가 $u=0$ 부터 10까지 변화할때에 대해 나타낸 그림들이다. Fig. 2의 경우

Table 1 Details of the pipes conveying fluid.

Materials	Silicon rubber
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^*	$1.723 \times 10^9 (\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2)$
Pipe mass per unit length m_p	0.139 (kg/m)
Fluid mass per unit length m_f	0.0352 (kg/m)
External damping coefficient C	0.0 (N·sec/m)

Table 2 Details of the tip mass.

Materials		Brass
Type A	Outer diameter d_o	23.9 (mm)
	Inner diameter d_i	13.3 (mm)
	Mass M	19 (g)
Type B	Outer diameter d_o	27.8 (mm)
	Inner diameter d_i	13.6 (mm)
	Mass M	38 (g)
Type C	Outer diameter d_o	27.6 (mm)
	Inner diameter d_i	13.3 (mm)
	Mass M	57 (g)

$u_{cr} = 6.20$, 최적유속 $u_{opt} = 3.53$ 이고, Fig. 3의 경우 $u_{cr} = 7.38$, 최적유속 $u_{opt} = 4.16$ 이다. 즉, 중력의 영향을 고려함으로써 인해 임계유속 값과 최적 유속값의 증가를 가져옴을 알 수 있다.

Fig. 4에서 Fig. 9는 말단질량비 M^* 가 각각 $M^* = 0.2, 0.4, 0.6$ 인 경우에 대해 송수관과 유체의 중력을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대한 고유치 변화를 나타낸 그림들이다. $M^* = 0.2$ 인 경우 중력을 고려하지 않은 Fig. 4에서는 $u_{cr} = 4.66$, $u_{opt} = 2.13$ 이고, 중력을 고려한 Fig. 5에서는 $u_{cr} = 5.89$, $u_{opt} = 2.81$ 이다. 또한, $M^* = 0.4$ 일 때 중력을 고려하지 않은 Fig. 6에서는 $u_{cr} = 4.27$, $u_{opt} = 1.57$ 이고, 중력을 고려한 경우인 Fig. 7에서는 $u_{cr} = 5.59$, $u_{opt} = 2.31$ 이다. $M^* = 0.6$ 인 경우에 있어서도 같은방법으로 Fig. 8에서 $u_{cr} = 4.15$, $u_{opt} = 1.29$ 이고, Fig. 9에서는

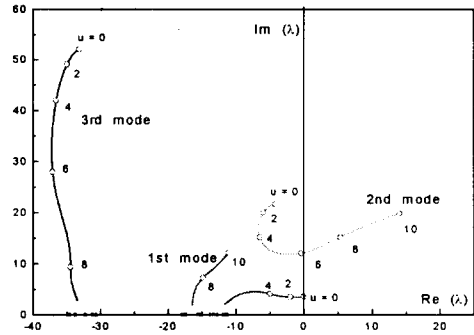


Fig. 2 Eigenvalue curves of the pipe without gravity ($M^* = 0.0$)

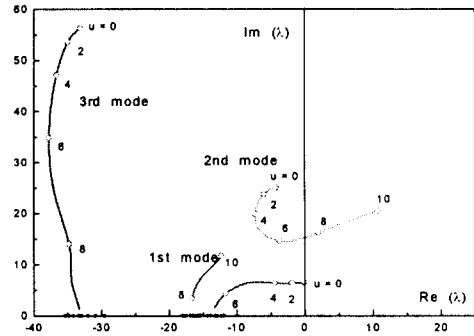


Fig. 3 Eigenvalue curves of the pipe with gravity ($M^* = 0.0$)

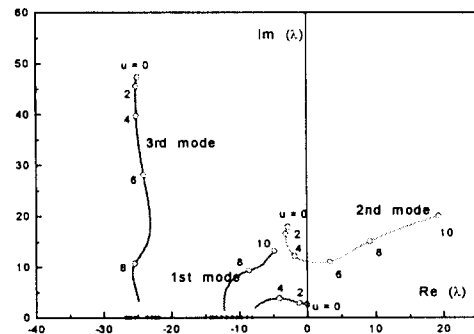


Fig. 4 Eigenvalue curves of the pipe without gravity ($M^* = 0.2$)

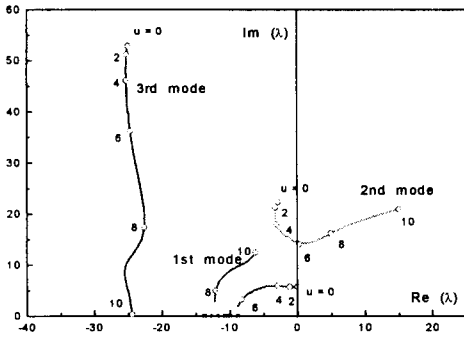


Fig. 5 Eigenvalue curves of the pipe with gravity ($M^* = 0.2$)

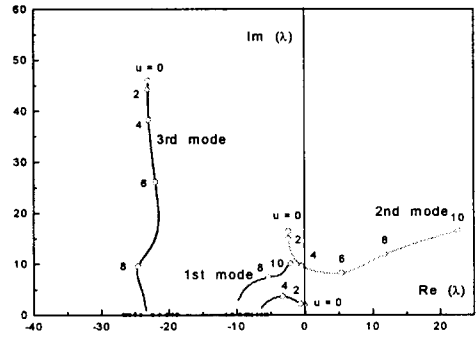


Fig. 8 Eigenvalue curves of the pipe without gravity ($M^* = 0.6$)

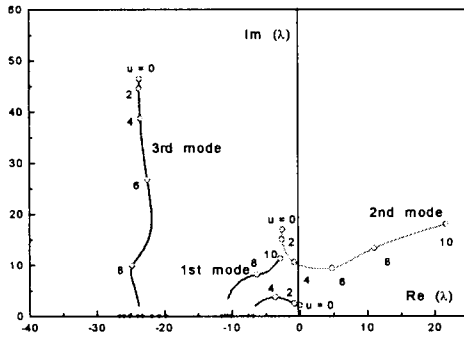


Fig. 6 Eigenvalue curves of the pipe without gravity ($M^* = 0.4$)

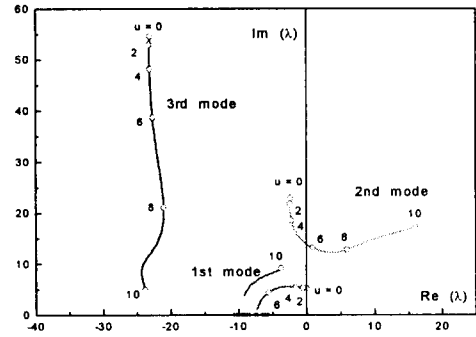


Fig. 9 Eigenvalue curves of the pipe with gravity ($M^* = 0.6$)

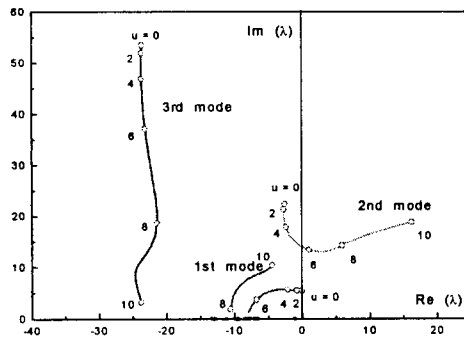


Fig. 7 Eigenvalue curves of the pipe with gravity ($M^* = 0.4$)

$u_{cr} = 5.68$, $u_{opt} = 2.11$ 이다.

이상의 수치해석을 통해 알 수 있는 것은 송수관의 중력을 고려함으로써 인하여 임계유속과 최적유속값을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 말단질량이 증가함에 따라 송수관의 중력을 고려하지 않은 경우

는 임계유속값과 최적유속값이 감소되나, 중력을 고려한 경우에는 $M^* = 0.0$ 부터 $M^* = 0.4$ 까지는 M^* 가 증가함에 따라 임계유속값과 최적유속값이 감소되지만 $M^* = 0.4$ 부터 $M^* = 0.6$ 까지에서는 임계 유속값이 다시 증가되는 경향을 나타내었다.

4. 실험장치 및 실험결과

4.1 실험장치

본 연구에서 모델로 잡은 수직 외팔 송수관의 불안정 현상을 실험적으로 검증하고, 외부의 외란 (disturbance)이 있는 경우 송수관의 플러터 불안정을 제어하기 위해 실험장치를 구상하였으며 실험장치 개략도는 Fig. 10과 같다.

4.2 빈 송수관의 고유진동수 측정 실험

본 연구의 수치시뮬레이션에서의 고유진동수값과 실험에서의 고유진동수가 잘 일치하는지를 살펴보기

Table 3 Comparison of natural frequencies of pipes without fluid between experiment and numerical simulation.

		Numerical simulation		Experiment
		Without gravity	With gravity	
M = 0.0	First	0.62 (Hz)	1.04 (Hz)	0.95 (Hz)
	Second	3.77 (Hz)	4.25 (Hz)	3.90 (Hz)
M = 0.2	First	0.45 (Hz)	0.91 (Hz)	0.85 (Hz)
	Second	3.14 (Hz)	3.76 (Hz)	3.35 (Hz)
M = 0.4	First	0.38 (Hz)	0.86 (Hz)	0.80 (Hz)
	Second	2.96 (Hz)	3.74 (Hz)	3.40 (Hz)
M = 0.6	First	0.33 (Hz)	0.83 (Hz)	0.80 (Hz)
	Second	2.88 (Hz)	3.81 (Hz)	3.55 (Hz)

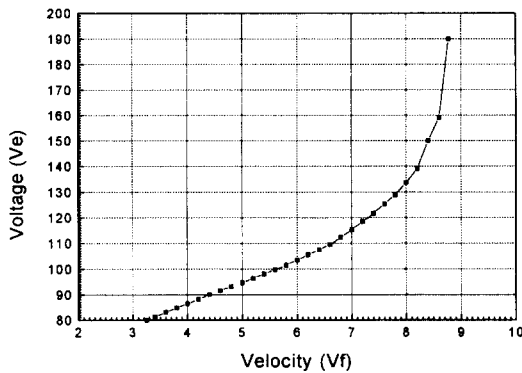


Fig. 11 Relations between fluid velocity and change of moter voltage.

위하여 유체가 없는 빈 송수관과, 빈 송수관에 말단 질량을 부착한 경우의 고유진동수를 실험을 통하여 측정된 후 수치시뮬레이션 결과와 비교하였다. 비교 결과들을 Table 3에 나타내었다.

말단질량이 있는 경우든 없는 경우든 실험치와 근사한 오차를 보이는 작은 송수관의 중력을 고려한 경우의 수치해이다. 이상으로 미루어볼 때 임계유속값이나 최적유속값에 대한 수치해와 실험값의 비교에 있어서도 송수관의 중력을 고려한 수치해를 실험치와 비교하는 것이 타당하다고 본다.

4.3 송수관의 안정성 실험

송수관의 불안정 실험은 먼저 말단질량이 없는 경

Table 4 Experimental fluid velocity and numerical one for stable and unstable state.

	Numerical analysis		Experiment	Phenomenon
	Without gravity	With gravity		
M* = 0.0 (M = 0 g)	7.399(m/s)	8.807(m/s)	8.75(m/s)	critical
	4.213(m/s)	4.965(m/s)	4.85(m/s)	stable
M* = 0.4 (M = 38g)	5.096(m/s)	6.672(m/s)	6.59(m/s)	critical
	1.874(m/s)	2.757(m/s)	2.71(m/s)	stable

우와 말단질량의 크기가 $M^* = 0.4$, 즉 $M = 38(g)$ 인 경우에 대해 행하였다. 불안정 실험에 앞서 모터의 전압변화에 따른 유속변화값을 산출하기 위해 모터와 연결된 가변 슬라이다스를 통해 전압을 변화시키면서 모터를 구동시켰다. 이러한 전압변화에 의한 유속변화와 전압변화의 관계그래프를 Fig. 11에 나타내었다. 이렇게하여 얻어진 그래프를 이용하고, 수치해석에서 산출된 무차원 유속값으로부터 실제유속을 계산하여, 이 계산된 유속값이 Fig. 11의 그래프의 어떤 전압에 해당되는지를 찾는다. 수치해로부터 계산된 실제유속값으로 유체를 이송시켜 송수관의 안정 및 불안정 현상을 관찰하였다.

Table 4는 말단질량이 없는 경우와 $M^* = 0.4$ 인 경우에 대해 수치해석으로부터 산출된 임계 및 최적 유속값에 대응하여, 실험적 유속값에서 예측되는 안정 및 불안정현상이 일어나는지를 조사하였다.

실험결과, 송수관의 중력을 고려한 예측과 수치해석의 유속값과 실험유속값이 근사하게 일치하고 있음을 알 수 있었으므로, 본 연구에서 설정한 수치해석모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

4.4 송수관의 진동억제 실험

외부로부터 송수관에 외란이 가해지면 송수관은 진동을 하게 되고 이 진동은 계에 좋지않은 영향을 주게됨으로 이를 제어할 필요성이 대두된다. 이러한 진동을 제어할 제어계는 비접촉식 레이저센서(noncontact type laser sensor), 조절기(controller) 역할을 하는 컴퓨터, 그리고 액츄에이터(actuator)로서의 솔레노이드 전자밸브로 구성된다. 즉, 센서로부터 외란에 의한 송수관의 변위가 어떤 상위 설정값(upper threshold value) 이상이 되면 전자밸브를 열어 최적유속을 지닌 유량으로 유체를 송수관 내부로 흘려보내고, 어떤 하위설정값(lower threshold value) 이하에서는 전자밸브를 작동시키지 않는

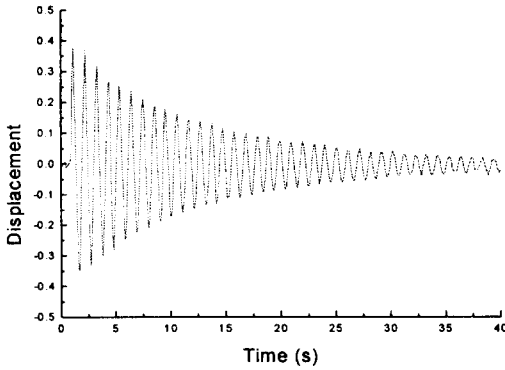


Fig. 12 Displacement change of the pipe without control ($\dot{M}=0.0$)

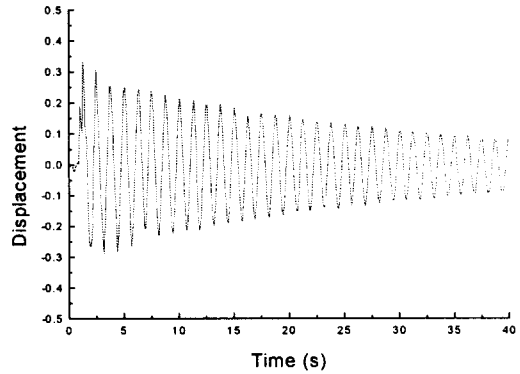


Fig. 14 Displacement change of the pipe without control ($\dot{M}=0.4$)

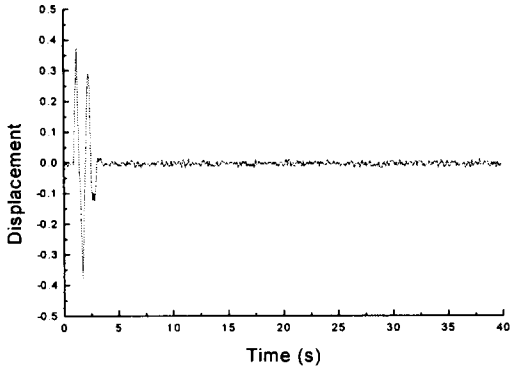


Fig. 13 Displacement change of the pipe with control ($\dot{M}=0.0$)

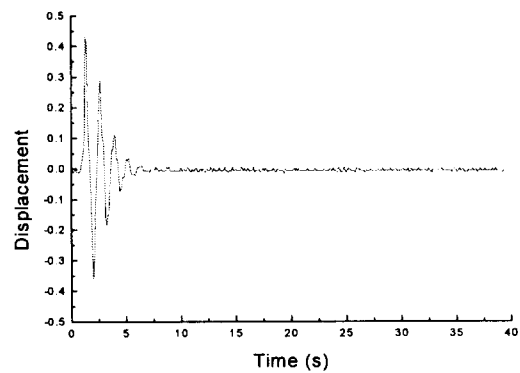


Fig. 15 Displacement change of the pipe with control ($\dot{M}=0.4$)

on-off 조절을 컴퓨터가 하게 된다. 변위센서가 진동신호를 감지하면, 그 아날로그(analog)신호는 A/D 변환기를 통해 디지털(digital)신호로 변환되며, 컴퓨터는 이 디지털 신호를 읽어 전자밸브를 제어하게 된다. Fig. 12는 외부로부터 외란이 주어진 경우 인위적인 제어가 없는 경우의 송수관의 임펄스 응답을 보여준다. 외란에 의한 진동은 천천히 감소되지만 어느정도 연속적이다. Fig. 13은 내부유동유체를 이용해 능동진동제어를 통한 송수관의 임펄스 응답을 보여준다.

할 수 있다.

5. 결 론

내부유동유체에 의한 수직 외팔 송수관의 불안정 및 진동제어에 관한 수치해석 및 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 내부유동을 갖는 수직 외팔 송수관의 수학적 모델에 대해 수치해석을 통한 임계유속값의 예측이 실험을 통하여 검증되었으며, 이 경우 반드시 송수관과 유체의 중력효과도 고려하여야 한다.

둘째, 중력을 고려한 경우의 임계유속값이나 최적 유속값은 그렇지 않은 경우에 비해 증가되며, 말단 질량이 존재하는 경우 중력을 고려한 경우는 말단 질량크기의 증가에 대해 $\dot{M}=0.4$ 까지는 임계유속값이 감소되나 $\dot{M}=0.4$ 에서 $\dot{M}=0.6$ 으로의 변환에 있어서는 다시 증가된다.

셋째, 송수관의 외부로부터 외란이 있는 경우 내부유동유체의 작용에 의해 송수관을 안정화시킬 수 있는 제어방법을 실험을 통하여 실현하였으며, 유체를 이용한 제어는 무한 자유도를 갖는 송수관과 같은 구조물에 있어서는 구조물 전체에 대해, 유체가 분포 actuator와 같은 역할을 하게됨으로 인하여 제어에 있어 흔히 나타날 수 있는 spillover 현상을 피할 수 있고, 부드러운 제진 작용이 이루어 질 수 있다.

후 기

본 연구는 95년도 한국학술진흥재단 자유공모과제(과제번호: 01 E 0373)연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다 .

참 고 문 헌

- (1) Ashley, H. and Haviland, G., 1950, "Bending Vibrations of a Pipe Line Containing Flowing Fluid," Journal of Applied Mechanics, Vol. 17, pp. 229~232.
- (2) Feodos'ev, V.P., 1950, "Vibrations and Stability of a Pipe when Liquid Flows through It," Izhenernyi Sbornik, Vol. 10, pp. 169~170.
- (3) 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.
- (4) Benjamin, T.B., 1961, "Dynamics of a System of Articulated Pipes Conveying Fluid(II.Experiments)," Proceedings of the Royal Society(London), Series A, Vol. 261, pp. 487~499.
- (5) 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.
- (6) Gregory, R.W. and Paidoussis, M.P., 1966, "Unstable Oscillation of Tubular Cantilevers Conveying Fluid(II. Experiments)," Proceedings of the Royal Society(London), Series A, Vol. 293, pp. 528~542.
- (7) Chen, S.S., 1971, "Dynamic Stability of Tube Conveying Fluid", Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 97, pp. 1469~1485.
- (8) 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, No.1, pp. 20-26.
- (9) Tani, J. and Sudani, Y., 1992, "Vibration Control of a Horizontally Cantilevered Pipe Conveying Fluid", Journal of the JSME, Series C, Vol.58, No. 554, pp. 2918~2922.
- (10) Sugiyama, Y., Katayama, T., Kanki, E., Nishino, K. and Akesson, B., 1996, "Stabilization of Cantilevered Flexible Structures by means of an Internal Flowing Fluid," Journal of Fluids and Structures, Vol. 10, pp. 653~661.