

〈논 문〉

복수 부가질량을 갖고 유동유체에 의한 수직외팔 파이프의
동적안정성에 관한 실험적 검증

Experimental Verification on Dynamic Stability of a Vertical
Cantilevered Pipe with Attached Masses Conveying Fluid

김 삼 일* · 정 승 호** · 류 봉 조***

Sam-il Kim, Seong-Ho Jung and Bong-Jo Ryu

(2001년 6월 1일 접수 : 2001년 8월 9일 심사완료)

Key Words : Dynamic Stability(동적안정성), Vertical Cantilevered Pipe(수직외팔 파이프), Galerkin's Method(갤러킨 방법), Attached Lumped Masses(부가 집중질량), Experimental Verification(실험적 검증)

ABSTRACT

The paper presents both theoretical and experimental study for dynamic instabilities of a vertical cantilevered pipe with two attached lumped masses conveying fluid. The two attached lumped masses can be considered as valves or some mechanical parts in real pipe systems. Eigenvalue behaviors depending on the flow velocity are investigated for the change of positions and magnitudes of an attached lumped mass and a tip mass. In order to verify appropriaty of numerical solutions, experiments were accomplished. Theoretical predictions have a good agreement with experimental ones.

1. 서 론

유체유발진동(flow induced vibration)으로 인한 송수관이나 배관계 구조물들의 동적 안정성에 관한 연구는 기계공학, 항공공학, 토목공학 등 공학의 여러 분야에서 많은 관심의 대상이 되어져 왔다.

예를들어, 열교환기 튜브들(heat-exchanger tubes), 원자핵 반응기 연료요소들, 감시 및 제어 튜브들, 항공기 엔진에서 열 차단판(heat shields)으로 사용되는 셸(shell) 구조물들, 원자핵 반응기에서 열 차단

판, 제트-펌프(jet pump), 유압기계에서 밸브들이나 다른 구성요소들 등을 들 수 있다.

내부 유동유체에 의한 파이프의 진동에 관한 연구의 시초는 Ashley와 Haviland⁽¹⁾에 의해 이루어졌는데 이들은 Trans-Arabian 송유관에서 관찰된 진동 현상을 규명하려는 시도를 하였다.

Benjamin^(2,3)은 내부 유동 유체가 흐르고 2자유도를 갖는 분절된 파이프(articulated pipe)의 동역학에 관한 이론 및 실험적 연구를 병행하였고, Hill과 Swanson⁽⁴⁾은 내부 유동 유체에 의한 외팔 수평파이프의 안정성에 미치는 부가 집중질량의 효과에 관한 연구를 하였는데, 이들은 수평파이프에 부착된 부가질량의 크기와 위치변화에 따른 계의 동적 안정성에 관한 연구를 하였다.

Sugiyama 등⁽⁵⁾은 한 개의 부가질량을 갖는 파이프의 내부에 유체가 흐를 때, 파이프의 동적 안정성을

* 정회원, 광림특장차(주)

** 정회원, 한국원자력연구소

*** 정회원, 한밭대학교 기계공학부

E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr

Tel : (042) 821-1159, Fax : (042) 821-1587

연구하였는데 이들은 특히 부가질량과 파이프의 감쇠가 동적 안정성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한, Sugiyama 등⁽⁶⁾은 집중질량을 갖고 탄성 스프링에 의해 지지된 외팔 수평 파이프의 내부에 유체가 흐르는 경우, 스프링과 집중질량의 복합효과가 계의 동적 안정성에 어떠한 영향을 미치는가를 이론과 실험을 병행하여 연구하였고, 최근 류봉조 등⁽⁷⁾은 끝단 부가질량을 갖고 내부 유동유체에 의해 운동하는 외팔 수직 파이프의 안정성과 진동제어에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

그러나 위의 연구들의 대부분은 수평 파이프거나 수평파이프에 부가질량이 한 개 부착된 모델에 대한 동적 안정성 연구들이었고, 다수의 부가질량을 갖는 모델에 대한 실험 및 수치해석적 연구는 아직 없는 실정이다.

본 논문에서는 파이프에 연결되어 있는 밸브 등의 기계장치들을 복수 부가질량으로 간주하고, 이러한 부가질량들을 갖는 수직외팔 파이프에 있어서, 파이프의 내부감쇠, 파이프와 부가질량의 중력효과 등을 고려하여 부가질량들의 위치와 크기변화가 파이프의 동적 안정성에 미치는 영향들을 수치 및 실험의 병행연구를 하는데 목적이 있다.

2. 이론해석

2.1 수학적 모델 및 운동방정식

Fig. 1은 말단에 집중질량 M 과 임의의 위치에 중간 부가질량 M_1 을 갖고, 내부 유동유체에 의해 운동하는 파이프의 수학적 모델을 나타낸다. Fig. 1에서 U 는 유체의 유속을 나타내고, L 은 파이프의 길이, L_1 은 중간 부가질량의 위치, x 와 y 는 각각 축 방향과 횡 방향 좌표, $w(x, t)$ 는 횡 방향 변위를 나타낸다.

Fig. 1에 나타난 수학적 모델에 대해 운동지배방정식을 유도하기 위해 에너지 표현식을 사용하면 다음과 같다.

$$T = \int_0^L \frac{1}{2} m_p \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx + \int_0^L \frac{1}{2} m_f (U^2 + 2U \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2) dx + \frac{1}{2} M_1 \left(\frac{\partial w(L_1)}{\partial t} \right)^2 + \frac{1}{2} M \left(\frac{\partial w(L)}{\partial t} \right)^2 \quad (1)$$

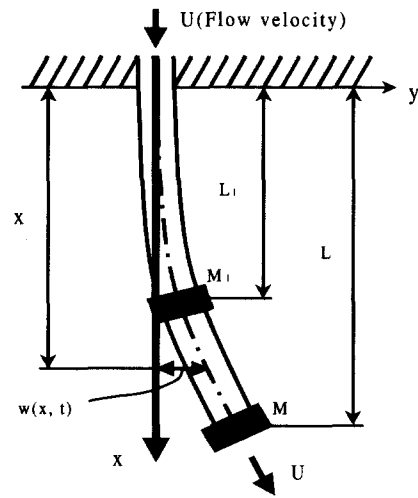


Fig. 1 A mathematical model of a vertical cantilevered pipe with two attached masses conveying fluid.

$$V = \int_0^L \frac{1}{2} EI \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx + \int_0^L \frac{1}{2} m g (L-x) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{1}{2} M_1 g \int_0^L (1-H(x-L_1)) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{1}{2} M g \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx \quad (2)$$

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

$$\delta W_f = - m_f U \left(\left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) + U \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \Big|_{x=L} + m_f U^2 \int_0^L \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (4)$$

식 (1)에서 m_p 와 m_f 는 각각 파이프와 유체의 단위 길이당 질량을 나타낸다.

식 (2)에서 m 은 $m_f + m_p$ 를 의미하고, E 는 파이프의 탄성계수, I 는 파이프 단면의 2차 모멘트, g 는 중력가속도, $H(x-L_1)$ 는 L_1 의 위치보다 큰 곳에서만 1의 값을 갖는 단위계단함수(Heviside unit step function)를 의미한다.

식 (3)은 내부 점성에 의한 가상일로써 계가 포텐셜을 갖지 않는 비보존적 성분을 표시한다. 또한, E^* 는 내부 점성 감쇠계수(internal viscous damping coefficient)이다.

식 (4)는 유체의 분사력에 의한 가상일로써, 첫째 항과 둘째항은 각각 유체력에 의한 비보존성분과 보존성분을 나타낸다.

식 (1)에서 (4)를 확장된 해밀톤 원리(extended Hamilton's principle)

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta V + \delta W_{i,d} + \delta W_f) dt = 0 \quad (5)$$

에 대입하고 변분을 정리한후, 계산상의 편리를 위해 다음과 같은 무차원 좌표들과 파라미터들

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{m_f}{m}, \quad \varphi = \frac{mgL^3}{EI}, \quad M^* = \frac{M}{mL}, \quad \overline{M}_1 = \frac{M_1gL^2}{EI}, \\ \gamma &= \frac{E^*}{EL^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \overline{M} = \frac{MgL^2}{EI}, \quad \alpha = \frac{M_1}{mL}, \quad \xi_1 = \frac{L_1}{L}, \\ \xi &= \frac{x}{L}, \quad \tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad u = UL \sqrt{\frac{m_f}{EI}}, \end{aligned} \quad (6)$$

을 도입하면 다음과 같은 무차원화된 운동 지배방정식과 경계조건식을 얻게된다.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + 2\beta^{\frac{1}{2}} u \frac{\partial^2 w}{\partial \tau \partial \xi} + u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \varphi \left\{ \frac{\partial w}{\partial \xi} - (1-\xi) \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right\} - \overline{M} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \gamma \frac{\partial^5 w}{\partial \xi^4 \partial \tau}$$

$$\alpha \delta(\xi - \xi_1) \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} - \overline{M}_1 (1 - H(\xi - \xi_1)) \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} = 0 \quad (7)$$

$$w(0, \tau) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial w(0, \tau)}{\partial \xi} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 w(1, \tau)}{\partial \xi^2} + \gamma \frac{\partial^3 w(1, \tau)}{\partial \xi^2 \partial \tau} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 w(1, \tau)}{\partial \xi^3} + \gamma \frac{\partial^4 w(1, \tau)}{\partial \xi^3 \partial \tau} - \overline{M} \frac{\partial w(1, \tau)}{\partial \xi} \\ = M^* \frac{\partial^2 w(1, \tau)}{\partial \tau^2} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (6)의 무차원 파라미터들에서 β 는 유체의 단위 길이당 질량과 유체와 파이프의 단위길이당 질량의 질량비를 나타내며, φ 는 유체와 파이프에 의한 중력 파라미터, M^* 는 말단 질량비, \overline{M}_1 은 중간 부가질량의 중력 파라미터, γ 는 내부점성감쇠 파라미터, \overline{M} 는 말단질량의 중력 파라미터, α 는 중간 부가질량비, ξ_1 은 무차원 중간 부가질량의 위치, ξ 는 무차원 축 방향 좌표, τ 는 무차원 시간, u 는 유속 파라미터를 나타낸다.

식 (11)의 해 $w(\xi, \tau)$ 를

$$w(\xi, \tau) = e^{\lambda \tau} \phi(\xi) \quad (12)$$

라 가정하고, 외팔보의 경계조건을 만족시키는 고유함

수(eigen-function) $\phi_j(\xi)$

$$\begin{aligned} \phi_j(\xi) &= \cosh s_j \xi - \cos s_j \xi \\ &\quad - \sigma_j (\sinh s_j \xi - \sin s_j \xi) \end{aligned} \quad (13)$$

를 이용하여 식 (11)을 최종적으로 정리하면 다음과 같은 행렬형태의 식을 얻게된다.

$$\lambda^2 [A] + \lambda [B] + [C] = 0 \quad (14)$$

식 (14)에서 각 행렬요소들의 성분들은 다음과 같다.

$$a_{ij} = (\phi_i, \phi_j) + M^* \phi_i(1) \phi_j(1) + \alpha \phi_i(\xi_1) \phi_j(\xi_1) \quad (15)$$

$$b_{ij} = 2\beta^{\frac{1}{2}} u (\phi_i, \phi_j) + \gamma (\phi_i, \phi_j^{(iv)}) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} c_{ij} &= u^2 (\phi_i, \phi_j^{(v)}) + \varphi (\phi_i, \phi_j^{(v)}) - \varphi (\phi_i, \phi_j^{(v)}) \\ &\quad + \varphi (\phi_i, \xi \phi_j^{(v)}) + (\phi_i, \phi_j^{(iv)}) - \overline{M} (\phi_i, \phi_j^{(v)}) \\ &\quad + \overline{M} \phi_i(1) \phi_j(1) - \overline{M}_1 (\phi_i, \phi_j^{(v)}) \end{aligned} \quad (17)$$

식 (14)로 주어지는 고유치 문제를 통한 파이프의 안정성은 다음과 같은 방법에 의해 판별된다.

고유치 λ 가 $\lambda = \epsilon + i\omega$ 일때, 실수부 ϵ 이 $\epsilon < 0$ 이면, 안정, $\epsilon > 0$ 인 경우는 불안정으로서 두가지 형태로 나뉘어 진다.

즉, $\epsilon > 0$ 일때 $\omega = 0$ 이면 발산형 불안정, $\omega \neq 0$ 이면 플러터 형태의 불안정이 된다.

3. 수치해석 결과 및 검토

임의의 위치에 부가질량 M_1 과 끝단에 말단 질량 M 을 갖고, 내부 유동유체에 의한 파이프의 동적 안정성에 대한 수치해는 Galerkin의 10항 근사해에 의해, 부가질량이 전혀 없는 이전의 연구 결과와 비교 하였으며, 그 결과 근사한 일치성을 보임으로써 본 논문의 수치해의 타당성을 검토하였다. 한편, 본 논문에서 사용된 β 값은 약 0.202이다.

Fig. 2에서 Fig. 6은 유속의 변화에 따른 고유값의 변화를 나타낸 그림들이다. 말단 질량비 M^* 가 $M^* = 0.2$ 일 때, 중간 부가질량의 위치 ξ_1 이 $\xi_1 = 0.2$ 의 고정된 위치에서 중간 부가질량비 α 값의 변화에 따른 임계유속값과 고유치 변화를 이 그림들을 통해 알 수 있다. 중간 부가질량의 크기가 증가될수록 임계 유속 값은 증가되고, 파이프는 2차 모드에 의해 플러터 불안정이 일어남을 알 수 있다.

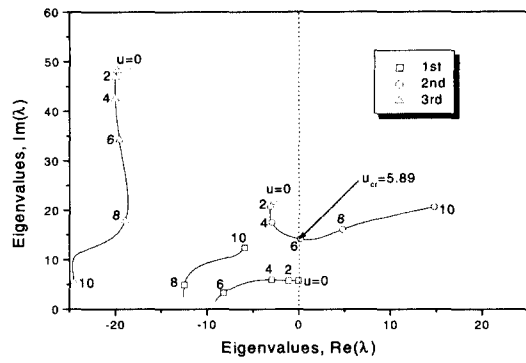


Fig. 2 Eigenvalue curves of the pipe with two attached masses. ($M^* = 0.2$, $\alpha = 0.2$, $\xi_1 = 0.2$)

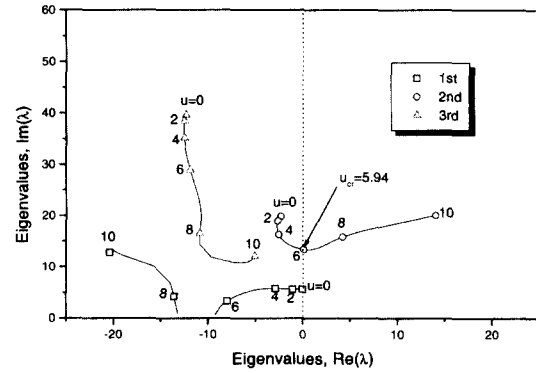


Fig. 5 Eigenvalue curves of the pipe with two attached masses. ($M^* = 0.2$, $\alpha = 0.8$, $\xi_1 = 0.2$)

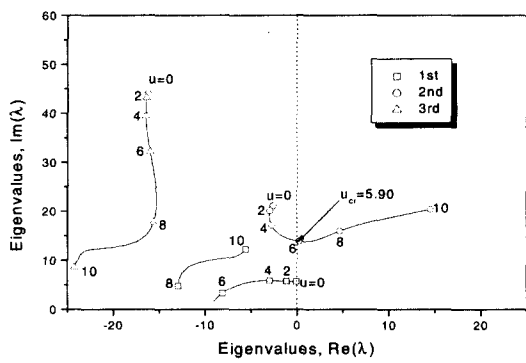


Fig. 3 Eigenvalue curves of the pipe with two attached masses. ($M^* = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\xi_1 = 0.2$)

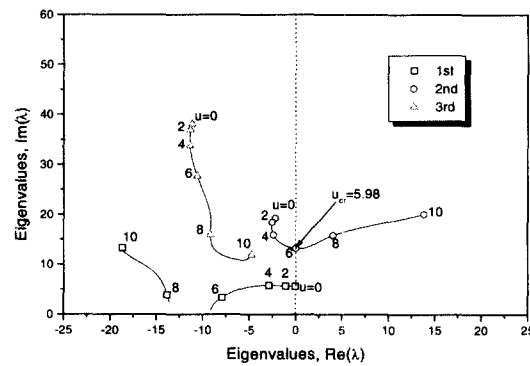


Fig. 6 Eigenvalue curves of the pipe with two attached masses. ($M^* = 0.2$, $\alpha = 1.0$, $\xi_1 = 0.2$)

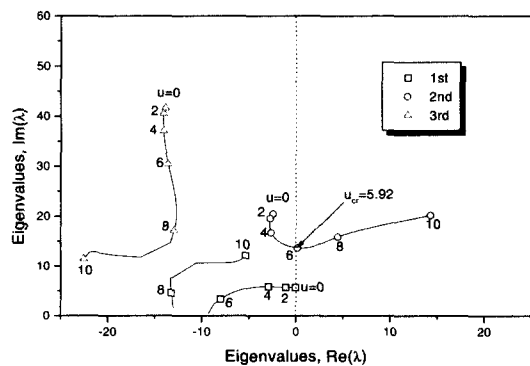


Fig. 4 Eigenvalue curves of the pipe with two attached masses. ($M^* = 0.2$, $\alpha = 0.6$, $\xi_1 = 0.2$)

Table 1은 말단 질량비 M^* 와 중간 부가질량비 α , 중간부가질량의 위치 ξ_1 값의 변화에 따른 임계 유속 값을 나타낸 표이다. Table 1을 통해 알 수 있는 것은 먼저 말단 질량비 M^* 가 $M^* = 0.2$ 일때는 고정된 부가질량의 위치 ξ_1 에 있어 부가질량비 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 항상 증가된다는 것이다.

또한, 고정된 α 값에 대해 고정단에서 자유단쪽으로 이동하는 부가질량의 위치 ξ_1 이 증가함에 따라 임계 유속값이 증가했다가 다시 감소되는 현상을 보임을 알 수 있다. 한편, 최대 임계 유속값은 $\alpha = 1.0$, $\xi_1 = 0.6$ 부근에서 일어난다.

둘째, $M^* = 0.4$ 일때는 부가질량의 위치 ξ_1 이 $\xi_1 = 0.2$ 보다 큰 위치에서는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 증가되고 있음을 알 수 있다. 한편, 최대 임

Table 1 Dimensionless critical flow velocity of pipes depending on M^* , α , ξ_1 .

M^* \ α \ ξ_1	0.2	0.4	0.6	0.8	
0.2	0.2	5.89	6.08	6.48	6.34
	0.4	5.90	6.49	7.18	6.72
	0.6	5.92	8.23	7.81	7.07
	0.8	5.94	8.38	8.30	7.38
	1.0	5.98	8.39	8.67	7.67
0.4	0.2	5.58	5.61	5.90	6.11
	0.4	5.57	5.71	6.39	6.58
	0.6	5.56	5.90	7.02	7.00
	0.8	5.56	6.23	7.75	7.37
	1.0	5.56	7.09	8.46	7.70
0.6	0.2	5.67	5.64	5.85	6.14
	0.4	5.65	5.66	6.16	6.58
	0.6	5.64	5.73	6.59	7.00
	0.8	5.63	5.87	7.15	7.39
	1.0	5.62	6.08	7.84	7.74
0.8	0.2	5.86	5.81	5.96	6.27
	0.4	5.84	5.79	6.17	6.67
	0.6	5.83	5.81	6.48	7.06
	0.8	5.81	5.88	6.89	7.44
	1.0	5.80	5.99	7.41	7.80
1.0	0.2	6.09	6.02	6.14	6.45
	0.4	6.07	5.98	6.28	6.81
	0.6	6.05	5.97	6.51	7.17
	0.8	6.04	6.00	6.82	7.53
	1.0	6.02	6.06	7.21	7.87

계 유속값은 $\alpha = 1.0$, $\xi_1 = 0.6$ 에서 일어난다.

셋째, $M^* = 0.6$ 일때도 $M^* = 0.4$ 인 경우와 유사한 경향을 나타내게 되는데, 즉, $\xi_1 = 0.2$ 에 있어서는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 감소되지만, $\xi_1 = 0.2$ 보다 큰 위치에서는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 증가됨을 알 수 있다. 또한, 최대 임계 유속값은 $\alpha = 1.0$, $\xi_1 = 0.6$ 에서 일어난다.

넷째, $M^* = 0.8$ 과 $M^* = 1.0$ 일때는 $\xi_1 = 0.2$ 에서 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 감소되지만, $\xi_1 = 0.4$ 에서는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 감소했다 다시 증가하고, $\xi_1 = 0.4$ 보다 큰 위치에서는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 증가됨을 알 수 있다.

또한, 최대 임계 유속값은 $M^* = 0.8$ 과 $M^* = 1.0$ 모두에 있어 $\alpha = 1.0$, $\xi_1 = 0.8$ 에서 일어난다.

4. 실험

4.1 실험장치

두 개의 부가 집중질량을 갖고 내부 유동유체에 의

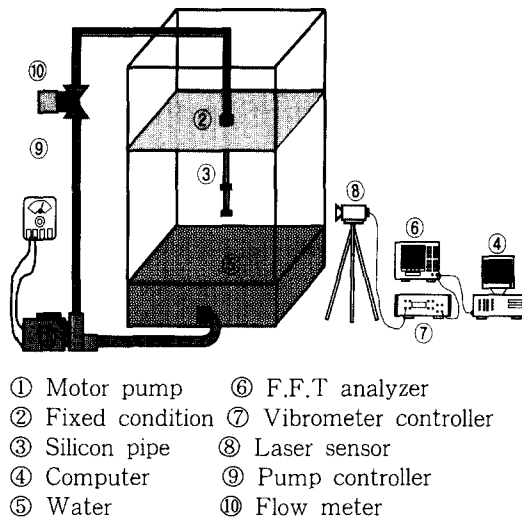


Fig. 7 Experimental setup of a vertical cantilevered pipe with attached masses conveying fluid.

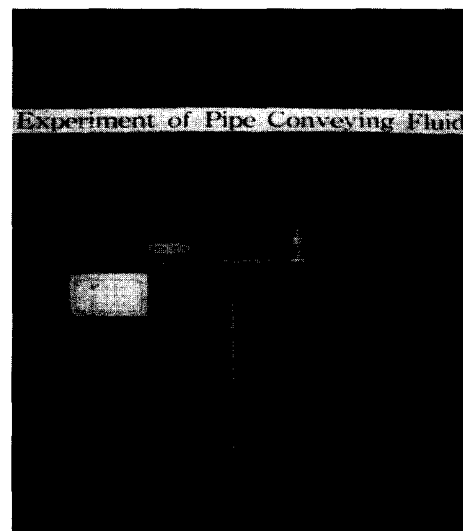


Fig. 8 Photograph of pipe systems conveying fluid.

한 파이프의 동적안정성에 관한 수치해의 타당성 검토를 위해 Fig. 7과 같은 실험장치를 구성하였다.

Fig. 7의 실험장치에 있어, 파이프의 고정단 ②는 원형 금속봉의 외부에 시험 파이프를 원형 링으로 견고하게 조여 고정단의 경계조건을 주었으며, 시험 파이프는 실리콘을 재료로한 유연한 파이프를 사용하였다. 또한, 수조는 가로, 세로, 높이 각각 1 m의 투명 아크릴을 이용하여 제작하였다.

Fig. 8은 부가 질량을 갖는 파이프 시스템을 보여주는 사진이다.

4.2 실험 및 실험결과

본 논문의 수치해석에 따른 임계 유속값의 예측을 실험을 통해 검증하기 위해 두 개의 부가질량을 갖는 파이프의 동적 안정성 실험을 행하였으며, 실험은 다음과 같은 절차에 의해 이루어졌다.

첫째, Fig. 7의 실험장치에 보여지는 수조로부터 모터 펌프에 의해 끌어올려진 물은 고무호스를 타고 디지털 유량계를 거쳐 수직으로 매달린 시험 파이프 내부를 흐르게 된다. 둘째, 모터펌프 컨트롤러에 의해 펌프의 회전수를 증가시켜 유속의 증가에 따른 파이프의 동적 안정성 실험을 행하였다. 셋째, 부가질량과 말단질량의 크기 및 부가 집중질량의 위치를 변화시켜가면서 임계 유속값에 미치는 영향을 조사하였다.

Table 2 Details and properties of the pipe, intermediate mass, tip mass and water.

Pipe	Materials	Silicon rubber
	Total length L	0.545 (m)
	Outer diameter d_o	0.0135 (m)
	Inner diameter d_i	0.0067 (m)
	Young's modulus E	9.72 (MPa)
	Internal damping coefficient E^*	1.723×10^5 (N · sec/m ²)
	Mass per unit length m_p	0.139 (kg/m)
Water	Density	998 (kg/m ³)
Attached masses	5 Types	19(g), 38(g), 57(g), 76(g), 95(g) (brass)
Tip masses	5 Types	19(g), 38(g), 57(g), 76(g), 95(g) (brass)

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

β	α	γ	Experimental	Numerical	Error (%)
			Velocity	Velocity	
0.2	0.2	0.2	7.09	7.03	0.87
	0.2	0.4	7.19	7.26	-0.98
	0.2	0.6	7.80	7.73	0.86
	0.4	0.6	8.46	8.57	-1.25
0.4	0.4	0.8	7.94	7.85	1.13
	0.6	0.4	7.09	7.09	0.70
	0.6	0.6	8.18	8.38	-2.39
0.6	0.6	0.4	7.09	6.84	3.69
	0.6	0.6	7.94	7.87	0.98
	0.8	0.8	8.75	8.82	-0.84
	1.0	0.6	8.89	9.36	-5.02
0.8	0.6	0.6	7.85	7.73	1.47
	0.8	0.8	8.84	8.88	-0.45
	1.0	0.2	7.28	6.92	5.17
	1.0	0.8	9.27	9.31	-0.47
1.0	0.6	0.6	7.89	7.77	1.61
	0.8	0.8	8.84	8.99	-1.64
	1.0	0.2	7.37	7.18	2.64
	1.0	0.8	9.08	9.39	-3.37

Table 2는 실험에 사용된 파이프, 중간 부가질량, 말단질량의 계원과 사용된 물의 물성치를 나타낸다.

Table 3은 실험에 사용된 말단질량과 부가질량의 질량비, 그리고 중간질량의 위치변화에 따른 임계 유속값의 실험치와 수치해석에 근거한 예측치를 나타낸 표이다.

Table 3을 통해 알 수 있는 것은 실험치와 이론치의 비교에 있어, 전반적으로 근사한 오차 범위내에 있음을 알 수 있으나, 말단질량의 크기와 중간질량의 크기가 비교적 작은 부분에 있어서는 오차가 더 작음을 알 수 있고, 말단질량과 중간질량의 크기가 증가함에 따라 오차는 약간 더 증가함을 알 수 있다.

오차의 원인으로 생각해볼 수 있는 것은 첫째, 모터 펌프의 구동에 의해 끌어올려지는 물은 경미하더라도 맥동현상을 보여 실제값으로 유량계의 눈금변화가 다소 있을 수 있다는 것, 둘째, 파이프의 고정단의 경계조건인데 원형 링으로 시험 파이프를 견고하게

조였더라도 완전 경계조건에는 미치지 못할 수 있다는 것, 셋째, 부가질량의 제작과정상의 경미한 가공오차, 넷째, 부가질량의 위치선정시의 경미한 오차, 다섯째, 말단질량이 어느 정도 유한 크기를 갖고있어, 말단질량의 회전관성의 영향도 있을 수 있으나 수치 해석상에서는 이를 고려하지 않은 것 등을 들 수 있다.

Fig. 9는 M^* , α , ξ_1 의 어떤 특정 값에서 얻은 파이프의 실험변위 값을 보여준다. 플러터 불안정이 일어나기 전의 안정한 파이프 상태에서 유속을 증가시켜 임계 유속값을 약간 지났을 때의 유속상태에 대하여 20초 동안의 변위를 나타낸 그림들이며, 변위의 센싱은 고정단으로부터 약 35 mm인 위치에서 이루어졌다.

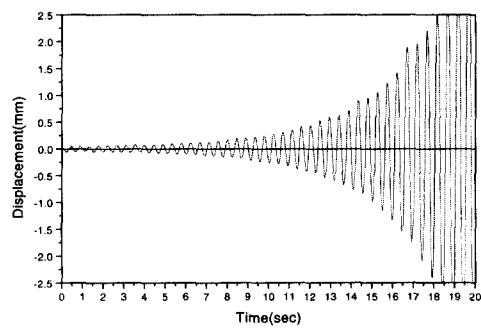


Fig. 9 Displacement curves of the pipe for 20 seconds. ($M^* = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\xi_1 = 0.2$)



Fig. 10 Flutter motion of the pipe with $M^* = 0.2$, $\alpha = 0.4$, $\xi_1 = 0.2$.

5. 결 론

말단과 중간위치에 부가집중질량을 갖고 내부 유동 유체의 유속변화에 의해 운동하는 파이프의 동적안정성에 대한 수치해석 및 실험적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 말단 질량비 M^* 가 $M^* = 0.2$ 일 경우는 고정된 중간 부가질량의 위치 ξ_1 에 대해, 중간 부가질량비 α 값의 증가에 따라 임계유속값은 항상 증가된다.

(2) 말단 질량비 M^* 가 $M^* = 0.2$ 보다 클 때에는 중간 부가질량의 위치 ξ_1 이 $\xi_1 = 0.2$ 인 경우는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값은 감소되고, $\xi_1 = 0.4$ 보다 큰 경우는 α 값의 증가와 함께 임계 유속값은 증가된다.

(3) 말단 질량비 M^* 가 $M^* = 0.2$ 보다 큰 경우라도, $M^* = 0.8$ 과 1.0에 있어서는 부가집중질량의 위치 ξ_1 이 $\xi_1 = 0.4$ 에 대해서는 α 값의 증가에 따라 임계 유속값이 감소했다가 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

(4) 이론 및 수치해의 타당성검토를 위해 실험을 행하였으며, 실험결과 이론적 예측값과 실험값이 근사한 일치율을 보였다.

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) 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.
- (3) 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.
- (4) Hill, J. L. and Swanson, C. P., 1970, "Effects of Lumped Masses on the Stability of Fluid Conveying Tube", Journal of Applied Mechanics, Vol. 37, pp. 494~497.

(5) Sugiyama, Y., Kumagai, Y., Kishi, T. and Kawagoe, H., 1986, "Studies on Stability of Pipes Conveying Fluid(The Effect of a Lumped Mass and Damping)", Bulletin of JSME, Vol. 29, pp. 929~934.

(6) Sugiyama, Y., Kawagoe, T. Kishi and S. Nishiyama, 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.

(7) Ryu, B. J., Jung, S. H. and Kang, Y. C., 1998, "A Study on the Dynamic Stability and Vibration Control of Cantilevered Pipes Conveying Fluid", Journal of the KSNVE, Vol. 8, No. 1, pp. 171~179.