

일정속도 유체를 운반하는 곡관의 유한요소 진동해석

Finite Element Vibration Analysis of a Curved Pipe Conveying Fluid with Uniform Velocity

이 성 현* · 정 의 봉† · 서 영 수**

Seong Hyeon Lee, Weui Bong Jeong and Young Soo Seo

(2008년 8월 5일 접수 ; 2008년 10월 2일 심사완료)

Key Words : Curved Beam Element(곡관 요소), Straight Beam Element(직관 요소), Finite Element Vibration Analysis(유한요소진동해석)

ABSTRACT

A method for the vibration analysis of curved beam conveying fluid with uniform velocity was presented. The dynamics of curved beam is based on the inextensible theory. Both in-plane motion and out-of-plane motion of curved beam were discussed. The finite element method was formulated to solve the governing equations. The natural frequencies calculated by the presented method were compared with those by analytical solution, straight beam theories and Nastran. As the velocity of fluid becomes larger, the results by straight beam model became different from those by curved beam model. And it was shown that the curved beam element should be used to predict the critical velocity of fluid exactly. The influence of fluid velocity on the frequency response function was also discussed.

1. 서 론

내부에 유체를 포함하는 배관은 산업현장에서 다양하게 적용되고 있다. 연료를 수송하는 관이나 열교환기 또는 원자로 냉각기 등 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 이에 대한 많은 연구가 진행 되어왔다. 대부분의 경우 유체를 포함하는 배관을 보(beam) 이론으로 가정한 연구^(1~3)와 두께가 얇은 shell 이론으로 가정한 연구^(4,5)가 이루어지고 있다. Seo⁽¹⁾는 조화맥동하는 유체를 운반하는 배관의 경우 임계속도 이하에서도 유체의 맥동성분으로 공진현상이 발생할 수 있음을 보였다. 또한 Jeong^(2,3)은 여러 개의

맥동성분을 갖고 주기적으로 맥동하는 유체를 운반하는 배관에 대한 안정성해석을 수행하였다. Seo⁽⁴⁾는 배관을 원통셀로 가정하여 일정속도를 갖는 유체를 운반하는 경우의 부가질량 및 주파수응답함수를 계산하였다. 그리고 Jeong⁽⁵⁾은 원통셀과 내부 유체에 대한 구조-음향 연성 해석을 수행하였다.

이상의 연구들은 직관요소(straight beam element)로 가정하여 배관에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 그러나 유체가 곡관을 지나가는 경우 속도벡터의 방향변화 등으로 인하여 배관구조에 미치는 영향이 다를 수 있으므로 보다 정확한 해석을 위해서는 곡관요소(curved beam element)의 모델링이 필요하다. 유체를 포함하는 곡관에 대한 연구는 별로 이루어지지 않고 있는데 이는 형상의 복잡성이 해석을 다소 어렵게 만들기 때문일 것이다. Chen⁽⁶⁾은 곡관에 대한 운동방정식을 유도하여 배관진동의 안정성을 해석하였다. 곡관에 대한 연구는 곡관의 중심길

† 교신저자: 정희원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : wbyeong@pusan.ac.kr
Tel : (051)510-2337, Fax : (051)517-3805

* 정희원, 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 정희원, 국방과학연구소

이가 변형에 따라서 변하는 경우(extensible)와 변하지 않는 경우(inextensible)이다. 곡관의 중심의 길이가 변하지 않는 경우는 두 가지 변위 사이에 상관관계가 존재하게 되어서 다소 쉽게 운동방정식을 다룰 수가 있다.

이 연구에서는 일정한 속도로 흐르는 유체를 내부에 포함하는 곡관에 대하여 고유진동수와 주파수 응답함수를 구하고자 한다. 중심길이가 변하지 않는 곡관 이론을 사용한 면내진동(in-plane vibration)과 면외진동(out-of plane vibration)에 대한 운동방정식에 대하여 유한요소 모델링을 수행하고자 한다. 그리고 곡관요소(C.B.E.)에서 구한 해석결과를 직관요소(S.B.E.)를 적용한 경우의 해석결과와 비교하여 곡관 요소 이론의 유용성을 검증하고자 한다. 또한 내부유체의 유속이 증가함에 따라서 발생하는 불안정성에 대해서도 살펴보려고 한다.

2. 지배방정식

2.1 운동방정식

유체를 포함하는 곡관의 요소를 Fig.1에 나타내었다. 곡관은 단면적 A_p , 단위길이당 질량 m , 굽힘강성 EI , 비틀림 강성 GJ , 곡률 R_0 로 구성되어 있다. 이 곡관 내에 단위길이당 질량 M 을 갖는 유체가 일정한 유속 U 를 가진다고 가정한다. 곡관의 운동방정식을 유도하기 위하여 곡관의 지름은 곡관의 길이와 곡률에 비해 작다고 가정하고 중력, 곡관의 감쇠 그리고 전단 효과를 무시한다. 곡관에 작용하는 힘과 모멘트의 평형 방정식을 이용하면 지배방정식⁽⁷⁾은 다음과 같다.

$$EI\left(\frac{\partial^4 u}{\partial s^4} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial^3 w}{\partial s^3}\right) + MU^2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial w}{\partial s} + \frac{1}{R_0}\right) + 2MU\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial s} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial w}{\partial t}\right) + (m+M)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = F_u \quad (1)$$

$$EI\left(\frac{\partial^4 v}{\partial s^4} - \frac{1}{R_0} \frac{\partial^2 \psi}{\partial s^2}\right) - \frac{GJ}{R_0}\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial s^2} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial^2 v}{\partial s^2}\right) + MU^2 \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + 2MU \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial s} + (m+M)\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = F_v \quad (2)$$

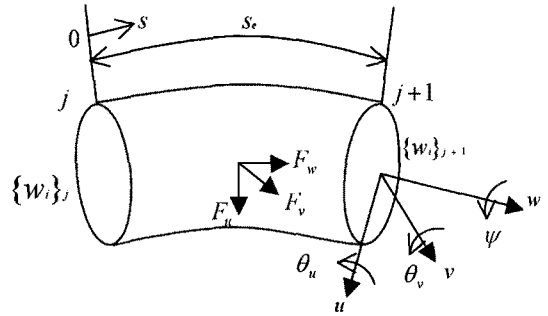


Fig. 1 Curved beam element

$$\frac{EI}{R_0}\left(\frac{\partial^3 u}{\partial s^3} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}\right) + \frac{MU^2}{R_0}\left(\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{w}{R_0}\right) - MU\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial s} - \frac{1}{R_0} \frac{\partial u}{\partial t}\right) - (m+M)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F_w \quad (3)$$

$$-GJ\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial s^2} + \frac{1}{R_0} \frac{\partial^2 v}{\partial s^2}\right) + \frac{EI}{R_0}\left(\frac{\psi}{R_0} - \frac{\partial^2 v}{\partial s^2}\right) + I_z \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

식(1)은 면내(in-plane)진동, 식(2)는 면외(out-of-plane)진동, 식(3)은 곡관의 길이 방향의 진동, 식(4)는 곡관의 비틀림에 관한 식이다. 만약 곡률 R_0 가 무한대가 되면 곡관의 식(1)과 식(3)은 다음과 같이 직관의 대한 식(8)이 된다.

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial s^4} + MU^2 \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + 2MU \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial s} + (m+M)\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = F_u \quad (5)$$

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial s^4} + MU^2 \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + 2MU \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial s} + (m+M)\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = F_v \quad (6)$$

곡관의 길이가 변하지 않는다고 가정하면 곡률의 중심으로 향하는 변위(u)는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$u = R_0 \frac{\partial w}{\partial s} \quad (7)$$

그리고 두 개의 변위 벡터가 이루는 평면의 각 변

위는 다음과 같이 나타낼 수 있으므로 한 평면 내에서 3개의 자유도를 가지게 된다.

$$\theta_v = R_0 \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \quad (8)$$

곡관의 길이 방향(\bar{w})과 곡률의 중심으로 향하는 방향(\bar{u})은 같은 평면 내에 있으므로 식(1)과 식(3)을 더하고 식(7)을 대입하면 아래와 같이 평면 내에서 변형하는 방정식으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} & EI \left(\frac{\partial^6 w}{\partial s^6} + \frac{2}{R_0} \frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + \frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right) \\ & + MU^2 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + \frac{2}{R_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \frac{w}{R_0^4} \right) \\ & + 2MU \left(\frac{\partial^4 w}{\partial t \partial s^3} + \frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial s} \right) + (m+M) \frac{\partial^4 w}{\partial s^2 \partial t^2} \\ & - (m+M) \frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{1}{R_0^2} F_w + \frac{1}{R_0} \frac{\partial F_u}{\partial s} \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 식(2)와 식(4)는 곡관이 놓여있는 평면에 수직으로 변형하는 변위 $v, \theta_u, \theta_w (= \psi)$ 를 나타내는 방정식이 된다. 여기서 변위 v 와 θ_u 는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\theta_u = \frac{\partial v}{\partial s} \quad (10)$$

따라서 in-plane과 out-of-plane은 각각 3개의 자유도를 가지므로 총 6개의 자유도를 가진 곡관의 방정식이 된다.

3. 유한요소 정식화

면내진동과 면외진동에 대한 운동정식을 유한요소법을 이용하여 다음과 같이 이산화할 수 있다.

3.1 면내(In-plane) 진동

곡관의 유한 요소 해석을 위해서 n 개의 요소로 분할하고 j 번째 요소에 대하여 변분을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_s^e \delta w^* L_i(w^*) ds \\ & = \int_s^e \delta w^* \left\{ \frac{1}{R_0^2} F_w \delta(s-s_j) + \frac{1}{R_0} \frac{\partial F_u}{\partial s} \delta(s-s_j) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $L_i(w^*)$ 는 식(9)의 좌변을 나타낸다. 길이 방향의 변위 w^* 를 다음과 같이 가정하면 각 요소 질량, 감쇠 그리고 강성행렬을 구할 수 있다.

$$w^* = [N_i] \{w_i\}^e \quad (12)$$

여기서 $[N_i]$ 은 형상함수, $\{w_i\}^e$ 는 요소의 변위 벡터이다. 각 요소의 절점은 3개의 자유도, 각 요소는 6개의 자유도로 다음과 같이 나타낸다.

$$\{w_i\}_j = \{w_j, u_j, \theta_{v,j}\}^T = \{w_j^*, R_0 \frac{\partial w_j^*}{\partial s}, R_0 \frac{\partial^2 w_j^*}{\partial s^2}\}^T \quad (13)$$

$$\{w_i\}^e = \{\{w_i\}_j, \{w_i\}_{j+1}\}^T \quad (14)$$

요소 내의 변위를 구하기 위해 길이 방향의 변위를 5차 다항식으로 아래와 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} w^* &= \alpha_1 + \alpha_2 s + \alpha_3 s^2 + \alpha_4 s^3 + \alpha_5 s^4 + \alpha_6 s^5 \\ &= [\phi] \{\alpha\} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\{\alpha\}$ 는 형상함수로 결정되는 상수이다. 식(13),(14),(15)를 이용하면 요소의 변위를 각 절점의 변위 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\{w_i\}^e = [A_i] \{\alpha\} \quad (16)$$

$$w^* = [\phi] [A_i]^{-1} \{w_i\}^e \quad (17)$$

단, $[A_i] = \{[\phi]_j, [\phi]_j', [\phi]_j'', [\phi]_{j+1}, [\phi]_{j+1}', [\phi]_{j+1}''\}^T$

식(17)을 식(11)에 대입하면 면내진동에 대한 이산화된 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[M_i]^e \{\dot{w}_i\}^e + [C_i]^e \{\dot{w}_i\}^e + [K_i]^e \{w_i\}^e = \{F_i\}^e \quad (18)$$

단,

$$[M_i]^e = (m + M)[A_i]^{-T} [[J_2] + \frac{1}{R_0^2} [J_1]][A_i]^{-1}$$

$$[C_i]^e = 2MU[A_i]^{-T} [[J_5] + \frac{1}{R_0^2} [J_4]][A_i]^{-1}$$

$$[K_i]^e = [A_i]^{-T} \{EI \{ [J_3] + \frac{1}{R_0^2} ([J_6] + [J_6]^T) + \frac{1}{R_0^4} [J_2] \}$$

$$+ MU^2 \{ [J_6] + \frac{1}{R_0^2} ([J_2] - [J_7]) - \frac{1}{R_0^4} [J_1] \} [A_i]^{-1}$$

$$\{F_i\}^e = F_w [A_i]^{-T} [\phi_1]^T + F_u [A_i]^{-T} [\phi_1]^T$$

$$[J_1] = \int_0^c [\phi_1]^T [\phi_1] ds, [J_2] = \int_0^c [\phi_1]^T [\phi_1]' ds$$

$$[J_3] = \int_0^c [\phi_1]^{mT} [\phi_1]^m ds, [J_4] = \int_0^c [\phi_1]^T [\phi_1] ds$$

$$[J_5] = \int_0^c [\phi_1]^T [\phi_1]'' ds, [J_6] = \int_0^c [\phi_1]^T [\phi_1]''' ds$$

$$[J_7] = \int_0^c [\phi_1]^T [\phi_1]'' ds$$

3.2 면외(Out-of-plane) 진동

면내진동과 동일한 방법으로 변분을 취하면 다음과 같다.

$$\int_0^c \{ \delta v^* L_{o1}(v^*, \psi^*) + \delta \psi^* L_{o2}(v^*, \psi^*) \} ds = \int_0^c \delta v^* F_v ds \quad (19)$$

여기서 L_{o1} 과 L_{o2} 는 각각 식 (2)과 (4)의 좌변을 나타낸다. v^* 와 ψ^* 를 다음과 같이 가정한다.

$$v^* = [N_2] \{w_o\}^e \quad (20)$$

$$\psi^* = [N_3] \{w_o\}^e \quad (21)$$

여기서 $\{w_o\}_j = \{v_j^*, \theta_{u,j}, \theta_{w,j}\}^T$ 이다.

요소의 변위를 구하기 위해 곡률의 중심 방향의 변형을 아래와 같이 가정하면 요소의 변위를 각 절점의 변위 벡터로 나타낼 수 있다.

$$v^* = [\phi_2][A_o]^{-1} \{w_o\}^e \quad (22)$$

$$\psi^* = [\phi_3][A_o]^{-1} \{w_o\}^e \quad (23)$$

단,

$$[A_o] = \{ [\phi_2]_j, [\phi_2]'_j, [\phi_3]_j, [\phi_2]_{j+1}, [\phi_2]'_{j+1}, [\phi_3]_{j+1} \}^T$$

식 (22)와 식 (23)을 식 (19)에 대입하면 면외 진동에 대한 이산화된 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[M_o]^e \{ \dot{w}_o \}^e + [C_o]^e \{ \dot{w}_o \}^e + [K_o]^e \{ w_o \}^e = \{ F_o \}^e \quad (24)$$

단,

$$[M_o]^e = [A_o]^{-T} [(m + M)[I_1] + I_2][A_o]^{-1}$$

$$[C_o]^e = 2MU[A_o]^{-T} [I_5][A_o]^{-1}$$

$$[K_o]^e = [A_o]^{-T} \{ EI \{ [I_3] - \frac{1}{R_0} ([I_6] + [I_6]^T) + \frac{1}{R_0^2} [I_4] \}$$

$$+ MU^2 [I_9] + GJ \{ \frac{1}{R_0^2} [I_2] + \frac{1}{R_0} ([I_7] + [I_7]^T) + [I_8] \} [A_o]^{-1}$$

$$\{ F_o \}^e = F_v [A_o]^{-T} [\phi_2]^T$$

$$[I_1] = \int_0^c [\phi_2]^T [\phi_2] ds, [I_2] = \int_0^c [\phi_2]^T [\phi_2]' ds$$

$$[I_3] = \int_0^c [\phi_2]^{mT} [\phi_2]^m ds, [I_4] = \int_0^c [\phi_3]^T [\phi_3] ds$$

$$[I_5] = \int_0^c [\phi_2]^T [\phi_2]'' ds, [I_6] = \int_0^c [\phi_2]^{mT} [\phi_3] ds$$

$$[I_7] = \int_0^c [\phi_2]^T [\phi_4]' ds, [I_8] = \int_0^c [\phi_4]^T [\phi_4] ds$$

$$[I_9] = \int_0^c [\phi_2]^T [\phi_2]''' ds$$

n 개의 분할된 요소의 행렬을 전부 결합하면 전체 곡관의 유한요소 방정식을 구할 수 있고 이를 이용해서 곡관의 고유진동수와 주파수응답함수를 구할 수 있다.

4. 해석결과(I)

4.1 해석 모델(I)

Fig. 2와 같은 양단이 고정된 반원형 곡관에 대해서 해석을 수행하였다. 곡관요소(curved beam element)의 타당성을 검증하기 위하여 이론해, 직관요소(straight beam element), 상용프로그램(Nastran)과 결과를 비교하였다. 해석을 위해서 사용된 모델의

치수는 아래와 같다.

4.2 내부 유체가 없는 경우

곡관 내에 유체가 없을 경우 각 방법으로 구한 고유진동수를 Table 1에 나타내었다. 1,3,5차 고유진

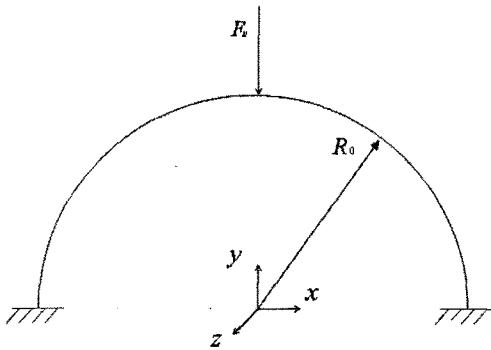
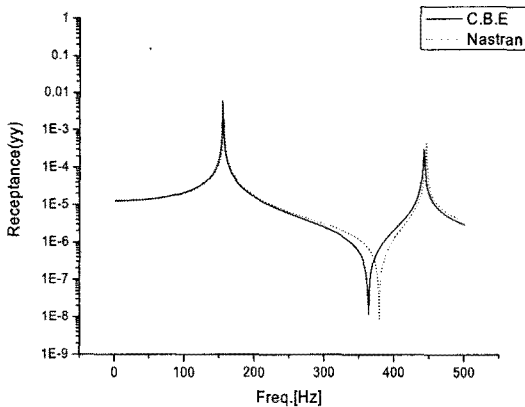
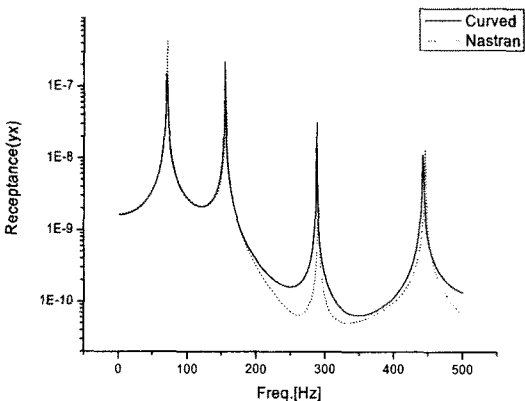


Fig. 2 Analysis model (I)



(a) Radial direction



(b) Tangential direction

Fig. 3 Receptances of the model (I)

동수는 out-of-plane 변형에 해당하고 2,4,6차 고유진동수는 in-plane 변형에 대한 결과이다. 해석적인 방법⁽⁹⁾의 경우는 1,2차 모드만 나타내었다. 각 방법들이 서로 비슷한 경향을 보이고 있으나 곡관 요소를 사용한 경우가 좀더 해석적인 방법과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 곡관에 힘이 가해질 때 주파수 응답 함수를 나타내었다. 상용프로그램과 비교해 볼 때 서로 잘 일치하므로 곡관 요소를 사용한 방법이 타

Table 1 Natural frequency of curved pipe without fluid [Hz]

	Analytical	Nastran	S.B.E	C.B.E
1st mode	30.6	29.6	29.6	29.8
2nd mode	70.5	71.1	71.3	70.5
3rd mode	X	85.3	85.4	85.9
4th mode	154.8	156.4	156.9	155.2
5th mode	X	178.8	179.2	180.2
6th mode	283.2	290.4	291.8	288.1

Table 2 Natural frequency of curved pipe containing fluid [Hz]

	S.B.E	C.B.E
1st mode	26.7	26.9
2nd mode	64.4	63.6
3rd mode	77.4	77.6
4th mode	141.7	140.1
5th mode	163.9	162.7
6th mode	263.5	260.1

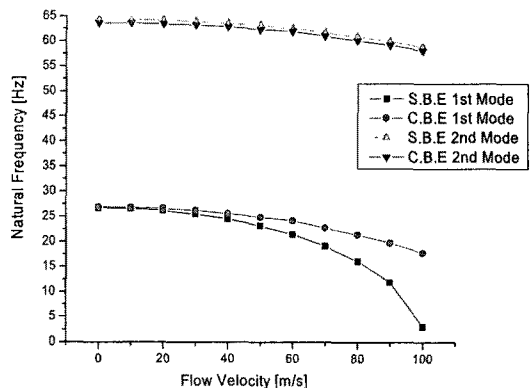


Fig. 4 Effects of flow velocity on natural frequencies for model (I)

당함을 Table 1과 Fig. 3을 통해서 알 수 있다.

4.3 내부 유체가 있는 경우

Table 2는 곡관 내에 유체(물)가 존재하는 경우 직관 요소와 곡관 요소를 비교하고 있다. 상용프로그램의 경우 직관 요소에 유체를 포함하는 경우를 해석할 수 없고 셸(shell) 요소에만 고려할 수 있으므로 제외하였다. Fig. 4는 곡관 내부 전영역에서 유체가 동일한 일정속도를 가지고 움직일 때 직관 요소와 곡관 요소로 구한 고유진동수의 변화를 나타낸 그림이다. 내부 유체의 속도가 증가함에 따라서 고유진동수가 점차 줄어드는 것을 알 수 있으며, 1차 고유진동수가 0이 되는 순간의 유체의 속도가 위험

속도가 된다. 그리고 2차 모드의 경우 직관 요소와 곡관 요소의 결과가 거의 일치하지만, 1차 모드의 경우 유체의 속도가 증가할수록 직관 요소로 구한 고유진동수와 곡관 요소로 구한 고유진동수의 차이가 점점 커짐을 있음을 알 수 있다. 따라서 곡관의 위험속도를 예측하기 위해서는 직관요소보다 곡관 요소를 이용하여 풀어야 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 5와 6은 두 가지 요소로 구한 주파수응답함수를 나타내고 있다. 유체속도가 증가함에 따라서 공진주파수가 낮아짐을 확인할 수 있다. 또한 유체속도가 작을 때는 직관요소와 곡관 요소의 결과가 일치하지만, 유체속도가 위험속도 근처로 큰 경우에는 곡관 요소를 사용해야 주파수응답함수의 저주파수 영역을 정확히 표현할 수 있음을 알 수 있다.

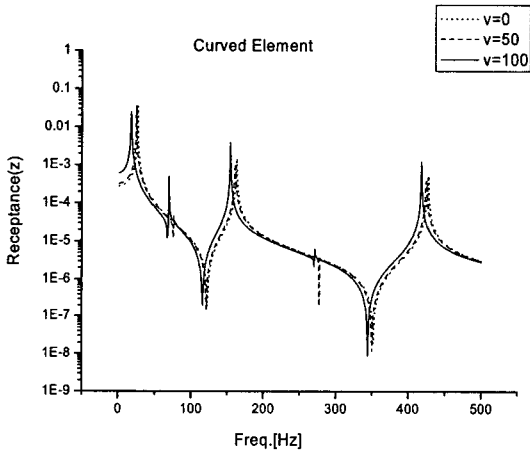


Fig. 5 Receptances of model (I) obtained by curved beam element

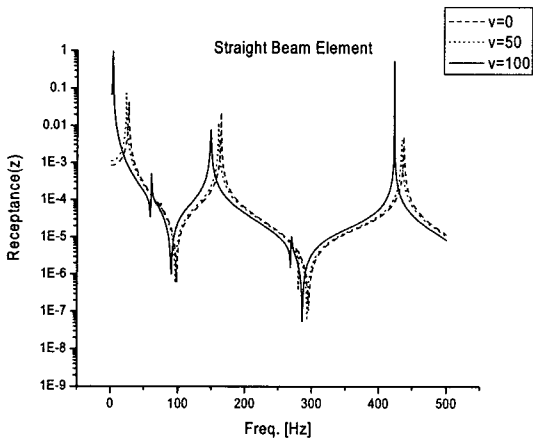


Fig. 6 Receptances of model (I) obtained by straight beam element

5. 해석결과(II)

5.1 해석 모델(II)

앞에 제시한 곡관 모델과 달리 형상과 경계조건이 다른 모델에 대해서 해석을 수행하였다. 모델의 형상은 Fig. 7에 나타내었다. 그리고 곡관의 치수는 아래와 같고 재질은 모델(I)과 동일하다.

$$R_0=0.1, d_i=0.007, d_o=0.008$$

5.2 내부 유체가 없을 때

Table 3은 곡관 내에 유체가 없는 경우를 나타내었다. 1,3,5차는 out-of-plane의 결과이고 2,4,6차는 in-plane에 해당하는 고유진동수이다. 세가지 모두 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

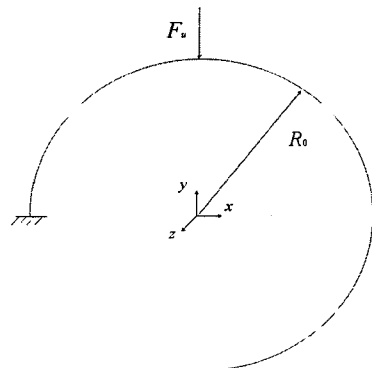


Fig. 7 Analysis model (II)

Table 3 Natural frequencies without fluid for model (II) [Hz]

	Nastran	S.B.E	C.B.E
1st mode	47.8	47.8	47.9
2nd mode	53.5	53.5	52.8
3rd mode	112.0	112.0	113.4
4th mode	116.8	117.2	115.8
5th mode	338.4	338.6	343.3
6th mode	349.7	352.2	348.3

Table 4 Natural frequencies with fluid for model (II) [Hz]

	S.B.E	C.B.E
1st mode	40.2	40.2
2nd mode	44.9	44.4
3rd mode	94.1	95.3
4th mode	98.4	97.3
5th mode	284.7	288.5
6th mode	296.2	292.7

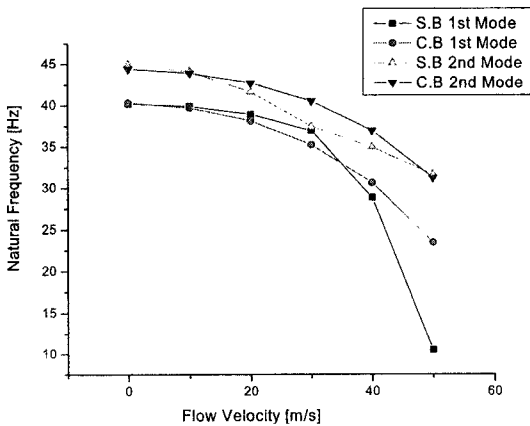


Fig. 8 Effects of flow velocity on natural frequencies for model (II)

5.3 내부 유체가 있을 때

Table 4는 곡관 내에 유체(물)가 존재하는 경우에 두 가지 요소의 방정식을 통해서 구한 고유진동수의 값을 나타내고 있다. Fig. 8은 유속의 변화에 따른 각 요소로 구한 고유진동수의 변화를 나타낸 그림이다. 1차 모드는 직관요소로 구한 고유진동수가 곡관 요소로 구한 고유진동수 보다 빨리 감소하고 2차 모드의 경우는 같은 비율로 감소하는 것을 알 수 있다.

내부 유체의 속도가 증감함에 따라서 공진점의

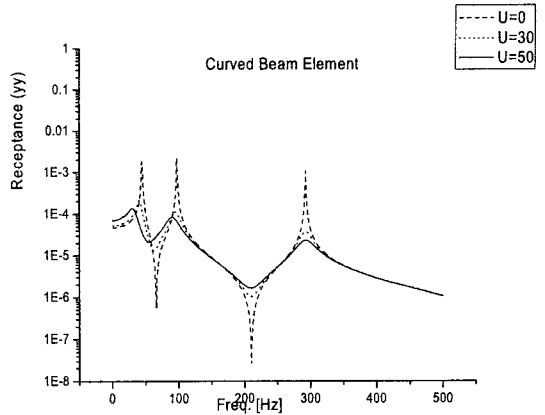


Fig. 9 Receptances of model (II) obtained by curved beam element

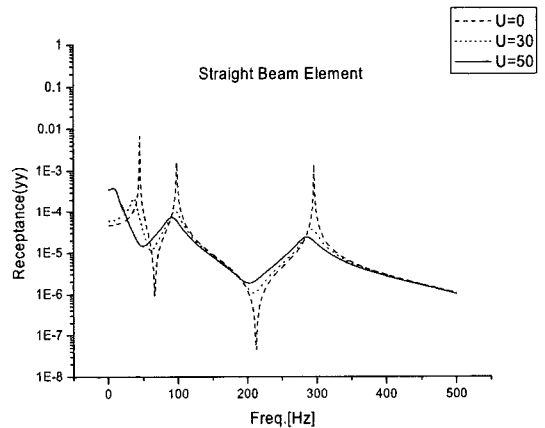


Fig. 10 Receptances of model (II) obtained by straight beam element

변화를 Figs. 9,10에 나타내었다. 두 가지 이론 모두 공진점이 아래로 이동하고 감쇠의 효과가 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 첫 번째 모델의 결과와 직관 요소의 위험속도 부근에서는 곡관 요소로 풀어야 하는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

내부에 일정한 속도를 갖는 유체를 포함하는 곡관의 지배방정식에 유한요소법을 적용하여 이산화된 지배방정식을 유도하였다. 그리고 이산화된 지배방정식으로부터 고유진동수와 주파수응답함수를 구하였고, 직관요소를 사용한 경우와 곡관요소를 사용한 경우의 해석결과의 차이를 검토하였다.

유체유속이 작을 때는 직관요소와 곡관요소의 결과가 일치하였지만, 유속이 증가할수록 고유진동수와 주파수응답함수의 결과가 달라짐을 확인하였다. 특히 유속이 증가하여 직관요소의 위험속도 부근에서는 곡관 요소의 해석이 바람직하다는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 배관의 위험속도를 정확히 예측하기 위해서는 곡관요소를 사용해야 할 것이다. 또한 유체의 속도가 고유진동수의 저감에 미치는 영향을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(계약번호UD060016DD)

참 고 문 헌

- (1) Seo, Y. S., Jeong, W. B., Jeong, S. H., Oh, J. S. and Yoo, W. S., 2005, "Finite Element Analysis of Forced Vibration for a Pipe Conveying Harmonically Pulsating Fluid", JSME International Journal, Series C, Vol. 4, pp. 688~694.
- (2) Jeong, W. B., Seo, Y. S., Jeong, S. H., Lee S. H. and Yoo, W. S., 2006, "Stability Analysis of a Pipe Conveying Periodically Pulsating Fluid Using Finite Element Method", JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 4, pp. 1116~1122.
- (3) Jeong, W. B., Seo, Y. S., Jeong, S. H., Lee, S. H. and Hong, C. S., 2006, "Vibration Analysis of Pipes Considering Fluid Pulsation", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 1050~1056.
- (4) Seo, Y. S., Jeong, W. B., Yoo, W. S. and Jeong, H. K., 2005, "Frequency Response Analysis of Cylindrical Shells Conveying Fluid Using Finite Element Method", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 625~633.
- (5) Jeong, W. B., Seo, Y. S., Ahn, S. J., Yoo, W. S., 2006, "Finite Element Vibration Analysis of Cylindrical Shells Conveying Fluid with Considering Acoustic-structure Interactions", JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 2, pp. 488~493.
- (6) Chen, S. S., 1987, "Flow-induced Vibration of Circular Cylindrical Structures", Hemisphere Publishing, Inc., New York.
- (7) Paidoussis, M. P., 1987, "Fluid-structure Interactions", Academic Press, San Diego.
- (8) Blevins, R. D., 1990, "Flow-induced Vibration", Van Nostrand Reinhold, New York.
- (9) Blevins, R. D., 1990, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", Van Nostrand Reinhold, New York.