

등가밀도를 이용한 유체 속에 잠긴 원통의 고유진동수 해석

Estimation of Natural Frequencies of Co-axial Cylinders  
Submerged in Fluid by Equivalent Density Approach

이 규만, 김 태완, 박 근배  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

유체와 구조물의 상호작용(Fluid Structure Interaction, FSI)으로 발생하는 부가질량(added mass)을 구조물의 등가 밀도(equivalent density)로 변환하여 구조물의 동특성을 해석하는 방법을 제안하였다. 2차원 포텐셜 유동(potential flow) 이론으로부터 유도된 부가질량 행렬을 이용하여 등가의 질량을 정의하고 구조물의 밀도로 변환하여 동특성 해석을 수행하였으며, 해석 방법의 타당성을 입증하기 위하여 유체로 연성된 두 개의 원통 쉘에 대한 동특성 해석을 수행하였다. 두 원통의 간격을 변화시키면서 고유진동수의 변화를 검토한 결과, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 두 원통의 최소 고유진동수를 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

A modeling method to treat the added mass caused by the fluid-structure interaction (FSI) in terms of the equivalent structural density is proposed. The magnitude of the equivalent mass is defined by the added mass matrix based on the 2-D potential flow theory, and the corresponding density is applied to perform eigenvalue analyses. To provide the validity of the proposed method, the eigenvalue analyses upon the two coaxial cylindrical shells coupled with a fluid gap are performed. The result on the varying fluid gap reveals that the proposed method provides is suitable to expect the fundamental frequencies of two cylinders.

1. 서 론

지진과 같은 외부 사건에 대한 원자로의 구조적 건전성을 입증하기 위하여 설계 과정에서 반복적인 동적해석을 수행한다. 동적해석의 유효성은 원자로의 동적해석 모델의 구성과 직접적인 관계를 가지고 있다. 동적해석 모델이 원자로의 동특성을 충실히 묘사하지 못하면, 가상된 사고에 대한 원자로의 구조적 건전성에 대한 신뢰도는 낮아진다. 원자로는 냉각수를 담고 있는 압력용기와 내부 구조물로 구성되며 냉각수와 내부구조물의 상호 작용으로 인한 동특성의 변화가 발생한다.

냉각수에 잠겨있는 원자로 내부구조물의 동특성에 관한 연구는 유체-구조물 상호작용(Fluid Structure Interaction, FSI)에 대한 연구를 중심으로 진행되고 있다. 유체에 잠겨있는 구조물이 운

동하면 주위에 있는 유체가 함께 운동하며 유체의 유동에 의한 압력이 생성된다. 이 압력은 구조물의 상대 가속도에 비례하고, 구조물에 유체역학적인 힘(hydrodynamic force)을 작용시키며, 유체역학적인 연성(hydrodynamic coupling)을 형성한다. 유체역학적인 연성은 구조물의 고유진동수와 감쇠특성에 영향을 미치며, 고유진동수에 미치는 영향은 부가질량(added mass) 혹은 가상질량(virtual mass)의 개념으로 설명할 수 있다<sup>[1]</sup>.

핵증기공급계통(Nuclear Steam Supply System, NSSS)은 방사선의 방호와 냉각을 위하여 다수의 구조물이 냉각수에 잠겨있다. 그러므로 유체에 잠겨있는 구조물의 동특성과 응답 특성에 대한 연구가 요구되었으며, 핵연료 집합체, 사용 후 핵연료 저장대 및 원자로 내부 구조물 등을 중심으로 많은 연구가 수행되었다. 원자로 압력용기와 내부구조물은 두 개의 원통 셸이 유체로 연성된 문제로 이상화하여 해를 구하였으며, 내부구조물의 동적해석 분야에 이용되어 왔다.

Chen<sup>[2][3]</sup> 등은 유체와 구조물의 운동방정식을 연성하여 유체로 연성된 두 개의 원통 셸의 고유진동수와 부가질량의 적용에 대한 해를 제시하였다. Au-Yang<sup>[4][5]</sup> 등은 원자로와 내부구조물을 길이가 다른 두 개의 원통 셸로 이상화하여 고유진동수를 구하고 실험을 통하여 타당성을 입증하였으며, 원자로의 동적해석 및 모델링 방법을 제시하였다. ASME<sup>[6]</sup>는 Au-Yang의 연구 결과를 기초로 유체로 연성된 원통 셸의 부가질량 계산 및 관련 동적해석 절차를 제시하였다. Fritz<sup>[7]</sup> 등은 포텐셜 유동(potential flow) 이론을 이용하여 2차원 상태에서 유체에 의한 부가질량을 산출할 수 있는 이론을 제시하였으며, ASCE<sup>[8]</sup>는 Fritz와 동일한 개념의 유체 부가질량을 이용하여 원자로 구조물의 동적해석을 수행하는 절차를 제시하였다. 김태룡<sup>[9]</sup> 등은 이론과 실험 및 유한요소법을 이용하여 FSI를 고려한 원자로 내부 구조물의 동특성을 해석하였으며, 유한요소 해석과 실험이 잘 일치함을 입증하였다. Perov<sup>[10]</sup> 등은 유한요소법을 이용하여 WWER-1000형의 원자로에 대한 FSI 현상을 연구하였다.

FSI 현상을 모사하기 위하여 사용되고 있는 방법은 유체의 영향을 부가적인 질량행렬로 정의하여 구조물과 연성하는 방법과 구조물과 유체를 연성한 운동방정식으로부터 동특성을 구하는 방법으로 구분할 수 있다. 전자의 경우에는 구조물과 유체간의 연성 효과를 질량행렬로 정의하여 해를 구하며, 후자는 이론적인 방법이나 수치해석법을 이용하여 연성된 운동방정식의 해를 구한다. 일반적으로 구조물의 동특성만을 예측할 경우에는 두 가지 방법이 모두 사용될 수 있으나, 동적해석을 수행할 경우에는 부가 질량행렬을 이용하는 것이 보다 효과적이다. 부가 질량행렬을 이용하면 유체의 모델링 과정을 생략할 수 있기 때문에 자유도의 수를 최소화할 수 있다. 부가 질량행렬은 대각항(diagonal term)과 비대각항(off-diagonal term)으로 구성되며, 유체와 구조물의 연성은 비대각항을 통하여 이루어진다. 유한요소 해석을 수행할 경우, 유체는 질량행렬로 대체하고 구조물과 질량행렬을 연성하여 모델을 구성한다. 그러므로 구조물과 각각의 질량행렬을 연성하는 과정에서 많은 노력이 요구된다. 이러한 노력을 최소화하기 위해서는 질량행렬을 등가밀도(equivalent density)와 같은 단순 물성치로 대체하여 적용할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 유한요소 해석 과정에서 부가 질량행렬을 등가밀도의 개념으로 단순화하여 구조물에 적용하고 동특성을 예측하는 방법을 제안하였다. Fritz<sup>[7]</sup>가 제안한 부가 질량행렬의 대각항(diagonal term)과 비대각항(off-diagonal term)을 이용하여 구조물의 등가밀도를 정의하고 구조물의 고유진동수를 예측하였다. 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 유체로 연성된 두 개의 원통에 대한 동특성 해석을 수행하였다.

## 2. 부가질량의 정의

유체로 연성된 원통의 부가질량을 정의하기 위하여 Fritz<sup>[7]</sup>가 제시한 해석 이론을 이용하였다. Fritz는 포텐셜 유동 이론(potential flow theory)을 이용하여 유체로 인한 구조물의 부가질량

(hydrodynamic added mass)을 정의하였다. 유체와 구조물간의 연성 상태는 강체(rigid)로 가정하였으며, 두 개의 원통사이에 유체 간격이 존재하는 경우에 대한 부가질량을 정의하였다.

## 2.1 유체로 연성된 두 개의 원통의 부가질량

그림 1은 유체로 연성된 두 개의 원통을 표시하고 있다. 그림에서 내부 원통의 외경은  $a$ , 외부 원통의 내경은  $b$ 이다. 원통의 길이는  $L$ 이며  $L$ 의 크기는  $a$ 와  $b$ 에 비하여 충분히 큰 값으로 가정한다. 두 원통 사이의 밀도가  $\rho$ 인 유체로 채워져 있다. 각각의 원통이 운동할 때 속도를  $\dot{x}_1, \dot{x}_2$ 로 정의하고, 두 원통간의 상대변위 ( $x_1 - x_2$ )는 원통의 반경에 비하여 충분히 작은 값으로 고려하여 미소 변형 상태(small displacement state)로 가정한다. 유체의 속도 포텐셜(velocity potential) 함수  $\phi$  는 다음과 같이 정의 된다.

$$V_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r}, \quad V_\theta = -\frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (1)$$

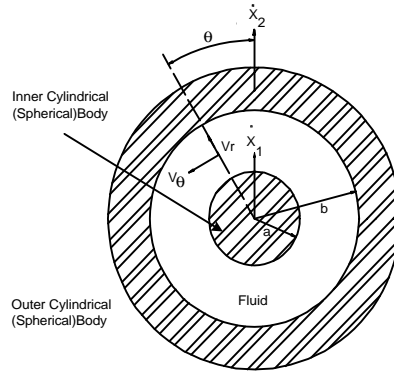


그림 1 유체로 연성된 두 원통 운동

여기서,  $V_r$ 과  $V_\theta$  는 반경방향 및 원주방향의 유체 속도이며, 유체는 비압축성 및 비회전성을 가지는 것으로 가정한다. 원통과 유체의 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} = \dot{x}_1 \cdot \cos \theta \quad \text{at} \quad r = a \quad (2)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} = \dot{x}_2 \cdot \cos \theta \quad \text{at} \quad r = b \quad (3)$$

연속방정식(continuity equation)은 식(4)로 표시되며, 경계조건을 고려하여 (4)식의 해는 (5)식의 형태로 가정한다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = 0 \quad (4)$$

$$\phi = f(r) \cdot \cos \theta \quad (5)$$

(5)식을 (4)식에 대입하여 연성하면 지배방정식은 (6)식과 같다.

$$r^2 f'' + r f' - f = 0 \quad (6)$$

식(2)(3)의 경계조건을 만족하는 (6)식의 해는 다음과 같다.

$$V_r = \left( \frac{B}{r^2} - A \right) \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$V_\theta = \left( \frac{B}{r^2} + A \right) \cdot \sin \theta \quad (8)$$

여기서,  $B = \frac{b^2 a^2}{b^2 - a^2} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$ ,  $A = \frac{\dot{x}_1 a^2 - \dot{x}_2 b^2}{b^2 - a^2}$  이다.

식(7)~(8)에서 유체의 속도성분은 원통의 운동을 나타내는 일반변수(generalized variable)  $x_1$ ,  $x_2$ 로 표시할 수 있다. 유체가 원통에 미치는 힘은 Lagrange의 운동방정식을 이용하여 다음과 표시할 수 있다.

$$F_{\dot{x}_i} = - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_f}{\partial \dot{x}_i} \right) + \frac{\partial T_f}{\partial x_i} \quad (9)$$

여기서,  $x_i$ 는 운동을 나타내는 일반 좌표계 (generalized coordinate)이며,  $T_f$ 는 유체의 운동 에너지를 나타낸다. 유체의 운동이 원통 사이의 간격에 비하여 작을 경우에는 (9)식의 마지막 항은 무시할 수 있으며<sup>[7]</sup>, 유체의 운동 에너지는 (11)식과 같다.

$$F_{\dot{x}_i} = - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T_f}{\partial \dot{x}_i} \right) \quad (10)$$

$$T_f = \int_a^b \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho \cdot r \cdot L \cdot dr \cdot d\theta (V_r^2 + V_\theta^2) \quad (11)$$

식(7),(8)및 (11)을 (10)에 대입하여 정리하면, 다음과 같이 두 개의 운동방정식을 얻는다.

$$\begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

여기서,

$$M_{11} = \pi \rho L a^2 \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right), \quad M_{22} = \pi \rho L b^2 \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right), \quad M_{12} = M_{21} = -2\pi \rho L a^2 \left( \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right)$$

이다. 식(12)는 내부에 잠겨있는 유체가 원통에 미치는 반력을 나타내며, 이를 고려하여 내부 원통과 외부원통에 대한 운동 방정식을 구성하면 (13)식과 같다.

$$\left( \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

여기서,  $m_{ij}$ 와  $k_{ij}$ 는 원통의 질량과 강성을 나타낸다. 식(13)에서 유체의 반력은 원통에 대한 부가질량의 개념으로 추가되었으며, 두 원통의 운동은 부가질량의 비대각항(off-diagonal term)에 의하여 연성된다. 이 방법은 길이 방향의 모드(longitudinal mode)가 미치는 영향은 고려되지 않았으나, 가장 낮은 진동수를 추출할 수 있는 효과적인 방법으로 사용되고 있다<sup>[1]</sup>.

## 2.2 등가밀도의 정의

유체에 잠겨있는 구조물의 모델링은 유체와 구조물에 대한 유한요소 모델을 구성하고, 유체와 구조물의 경계 영역에서 구조물과 유체의 자유도를 연성하여 완성된다. 따라서 구조물의 형상에 따라 매우 복잡한 연성과정을 거쳐야 하며 자유도의 수도 증가한다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 Au-Yang<sup>[5]</sup>은 유한요소 모델에서 유체를 요소를 배제하고 부가 질량행렬을 이용하여 동적해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 유체 요소를 부가 질량행렬로 대체하여 자유도를 최적화할 수 있었으나, 질량 행렬을 구조물과 연성하는 과정이 남아있기 때문에 3차원 요소를 사용하는 해석에는 적합하지 않다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 질량행렬을 등가밀도(equivalent density)로 환산하여 동특성 모델을 구성하는 방법을 제안하였다. 이 것은 2.1절을 통하여 정의된 부가질량 행렬의 항목을 이용하여 두 개의 원통에 대한 등가밀도로 환산하고 구조물의 밀도에 부가하여 고유진동수를 구하는 방법이다. 2.1절의 식(12)를 각 원통에 작용하는 유체의 힘으로 정리하면 식(14)와 같다.

$$F_{f1} = -(M_{11}\ddot{x}_1 + M_{12}\ddot{x}_2), \quad F_{f2} = -(M_{21}\ddot{x}_1 + M_{22}\ddot{x}_2) \quad (14)$$

식(14)에서 내측 원통의 최저 고유진동수는 외측 원통의 운동을 정지상태( $\ddot{x}_2=0$ )로 가정할 때 관찰되며<sup>[7][8]</sup>, 외측 원통의 최저진동수는 내측원통과 외측원통이 동일한 위상(in-phase motion)으로 운동할 때( $\ddot{x}_1 = \ddot{x}_2$ ) 나타난다.

$$\begin{aligned} F_{f1} &= -M_{11}\ddot{x}_1 = -\pi\rho L a^2 \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) \ddot{x}_1, \\ F_{f2} &= -(M_{21}\ddot{x}_2 + M_{22}\ddot{x}_2) \\ &= -\pi\rho L \left( -2a^2 \left( \frac{b^2}{b^2 - a^2} \right) + b^2 \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) \right) \ddot{x}_2 \\ &= -\pi\rho L b^2 \ddot{x}_2 \end{aligned} \quad (15)$$

등가밀도는 식(15)을 이용하여 각각의 원통에 대하여 정의할 수 있다. 내측 원통의 등가밀도는 식(15)에서  $F_{f1}$  로 정의되는 부가질량을 이용하고, 외측 원통의 경우에는  $F_{f2}$  로 정의되는 부가질량을 고려하여야 함을 알 수 있다. 식(15)에서 표시한 것과 같이  $F_{f2}$  정의되는 부가질량의 크기는 내부 원통이 없는 상태에서 외측 원통이 담고있는 냉각수의 질량과 동일함을 알 수 있다. 부가질량을 정의하는 과정에서 두 원통간의 거리에 대한 무차원 변수  $C_m$  을 식(16)과 같이 정의 하였다.  $C_m$  의 값이 증가할수록 원통의 간격은 좁아지며,  $C_m$ 의 값이 1.0에 접근할 수록 원통의 간격은 커진다.

$$C_m = \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \right) \quad (16)$$

본 연구에서 제안한 방법은 질량행렬과 구조물의 연성과정을 생략하고 구조물의 등가밀도만을 적용하기 때문에 전체적인 모델링 과정을 단순화할 수 있다. 그러나 원통과 유체사이의 연성효과가 완전하게 고려되지 않기 때문에 구조물의 응답을 구하는 과정에서 유체에 의한 연성효과가 응

답에 영향을 미칠 수 있다.

### 2.3 유체로 연성 된 두 개의 원통의 동특성 해석

등가밀도를 이용한 모델링 방법의 타당성을 입증하기 위하여 그림 1과 같이 유체가 채워진 두 개의 원통에 대한 고유진동수 해석을 ANSYS<sup>[11]</sup>을 이용하여 수행하고, 그 결과를 등가밀도를 이용한 해석과 비교하였다. 그림 2와 3에 표시한 것과 같이 원통은 쉘 요소를 사용하여 구성하고, 유체는 유체 요소를 이용하여 모사하였다. 원통의 두께를 고려하여 중립면에서 쉘 요소를 구성하고 유체와 원통이 접하는 경계에서 각각의 자유도를 연성하였다. 유체의 물성치는 물을 참조하였다. 두 원통의 간극 변화에 따른 동특성의 변화를 관찰하기 위하여  $C_m$  을 1.12에서 12.02 범위까지 변화시켰다. 표 1에 표시한 것과 같이 내측 원통의 반경( $a$ )은 0.1로 고정하고 외경( $b$ )을 증가시켜  $C_m$ 의 값의 변화시키고, 원통의 길이는 두 가지로 경우로 변경하여 동특성의 변화를 검토하였다. 각 원통의 등가 밀도는  $C_m$ 에 따라 표 1로 정의되며, 내측원통과 외측원통의 물성치에 등가밀도를 부가하여 고유진동수를 구하였다.

표 1 두 개의 원통 및 유체 간격

$a(m)$	$b(m)$	간격( $m$ ) <sup>*</sup>	$C_m$	내측원통의 부가 밀도 <sup>**</sup>	외측원통의 부가 밀도 <sup>**</sup>
0.1	0.14	0.01	12.02	26496	1860
0.1	0.15	0.02	6.29	13864	2025
0.1	0.20	0.07	2.26	4980	2852
0.1	0.30	0.17	1.39	3062	4513
0.1	0.40	0.27	1.20	2632	6176
0.1	0.50	0.37	1.12	4676	7814

\* 간격= $(b-a)-0.03$ (두께)  
 \*\* 식(15)를 이용하여 부가질량을 정의하고 원통에 대한 등가밀도로 변환

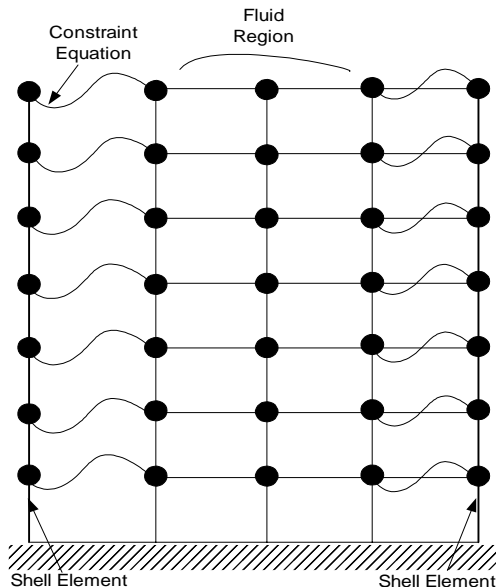


그림 2 쉘-유체 요소의 모델링

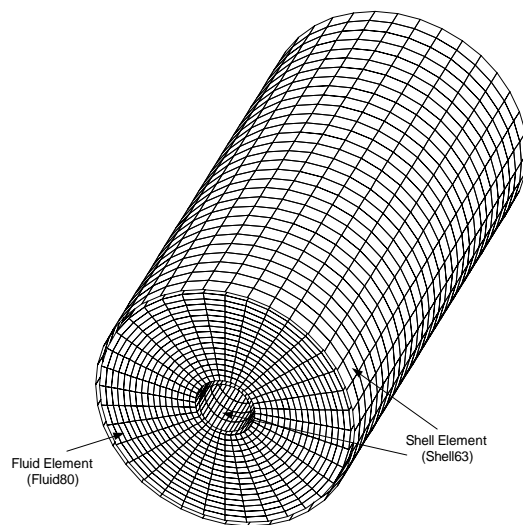
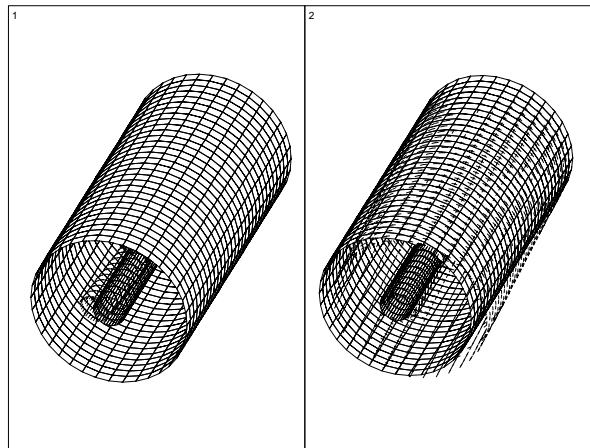


그림 3 유체를 포함한 유한요소모델

### 3. 결과 및 고찰

등가밀도를 이용한 원통의 고유진동수를 유체를 포함한 모델의 고유진동수와 동일하게 모사하기 위하여 모드의 형상과 기여도를 고려하여 유체를 포함한 모델로부터 최소 고유진동수를 추출하였다. 그림 4는 유체와 연성된 모델에서 원통의 진동 모드만을 표시한 것이다. 그림에 표시한 것과 같이 모드 형상은 외팔 보의 모드형상을 나타내고 있다. 그림 4(a)에서는 외측 원통의 운동이 거의 관찰되지 않았으며, 그림 4(b)에서는 외측 원통과 내측 원통이 동일한 위상으로 운동하는 모드가 나타남을 확인 할 수 있다. 그러므로 등가밀도를 정의하기 식(14) 및 (15)에 도입한 원통의 위상에 대한 가정이 타당하였음을 알 수 있다.

그림 5와 표 2, 3은 수평방향의 동특성 해석결과를 표시한 것이다. 그림과 표를 살펴보면 각각의 원통에서 구한 최저 고유진동수가 유체를 포함한 모델의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 최대 오차는 9.4%로 관찰되었으며, 원통의 길이가 커질수록 오차가 감소하였다. 두 번째 모드의 경우에는 일차 모드에 비하여 오차가 다소 증가하였다. 원통의 간격에 따른 오차는 일정한 경향을 보이지 않았으나, 간격의 크기가 동일한 경우에는 원통의 길이가 증가할수록 오차가 감소하는 경향이 관찰되었다. 이것은 최소 고유진동수가 외팔 보의 진동 모드와 연관되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 그림 5와 표 2, 3의 결과를 고려할 때, 등가밀도를 이용하여 각 원통의 최저 고유진동수를 예측하는 방법은 타당한 것으로 판단된다.



(a) 내측원통의 지배모드 (b) 동일 위상 모드  
그림 4 내/외측 원통의 진동 모드

표 2 유체와 연성된 모델과 등가밀도를 이용한 모델의 동특성 비교 (a/L=0.1)

$C_m$	Full F.E. Model		Equivalent Model		Difference (%)	
	1st Mode	2nd Mode	1st Mode	2nd Mode	1st Mode	2nd Mode
12.02	97.6	222.3	89.2	222.1	9.4%	0.1%
6.29	120.0	230.8	112.0	232.2	7.1%	0.6%
2.26	156.3	273.6	146.0	272.8	7.1%	0.3%
1.39	166.7	329.5	158.4	315.8	5.2%	4.3%
1.20	167.4	352.4	161.6	328.8	3.6%	7.2%
1.12	166.3	357.4	162.9	327.3	2.1%	9.2%

표 3 유체와 연성된 모델과 등가밀도를 이용한 모델의 동특성 비교 ( $a/L=0.05$ )

$C_m$	Full F.E. Model		Equivalent Model		Difference (%)	
	1st Mode	2nd Mode	1st Mode	2nd Mode	1st Mode	2nd Mode
12.02	23.9	59.8	23.3	60.4	2.6%	1.0%
6.29	29.4	62.6	29.3	63.8	0.3%	1.9%
2.26	39.3	78.1	38.2	79.5	2.9%	1.8%
1.39	42.7	105.2	41.4	103.1	3.1%	2.0%
1.20	43.4	124.4	42.2	118.4	2.8%	5.1%
1.12	43.7	137.2	42.6	127.7	2.6%	7.4%

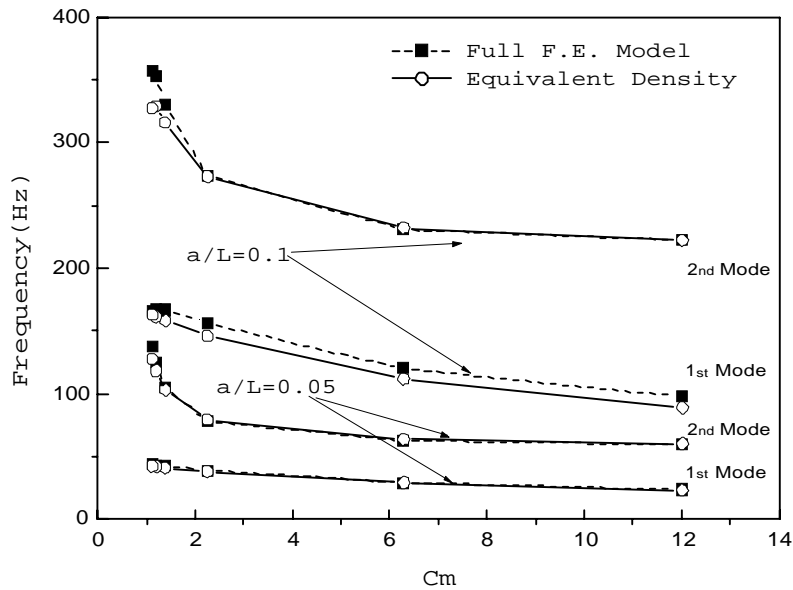


그림 5 두 개의 원통에 대한 동특성 해석 결과

등가밀도를 이용한 동특성 해석방법은 일정한 크기의 부가질량만을 고려하여 구조물의 동특성을 예측한다. 완전한 형식의 부가 질량행렬을 이용할 경우에는 유체와 구조물을 연성하는 효과가 비대각항으로부터 고려되지만, 등가밀도를 이용할 경우에는 이러한 연성 효과는 고려되지 않는다. 유체와 구조물간의 연성 효과는 구조물의 응답에 영향을 미치며, 유체 간격의 크기 및 구조물의 특성에 따라 응답에 미치는 영향이 다르다. 유체를 포함한 모델의 결과로부터 내측 원통의 고유진동수로 모사한 모드의 기여도가 작은 것으로 관찰 되었으며, 외측 원통의 모드가 전체 계의 응답을 지배하는 것으로 나타났다. 따라서 내측 원통의 응답이 전체 계에 미치는 영향이 작기 때문에 내측 원통의 동특성만을 모사하여도 유효한 해를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 유체에 잠긴 원통형 구조물의 동특성을 예측하기 위하여 부가 질량행렬을 등가밀도로 변환하여 동특성 모델을 구성하고 고유치 해석을 수행하는 방법을 제시하였다. 두 개의 원통에 대한 부가질량 행렬을 2차원 포텐셜 유동 이론으로부터 유도하고, 원통의 운동 위상에 따른 등가밀도의 산출 방법 제시하였다. 등가밀도를 이용하여 고유치 해석을 수행하고 그 결과를 유체 요



소를 포함한 유한요소 해석결과와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 두 개의 원통에 대한 해석 결과 부가질량을 이용한 동특성 해석과 유체를 포함한 해석결과가 잘 일치 하였다.
- 2) 부가질량을 등가밀도로 변환하여 동특성 모델을 구성함에 따라 모델링의 구성과정을 단순화하고 해석 시간을 최적화할 수 있다.
- 3) 부가질량을 사용함에 따라 구조물의 고유 진동수는 유지되지만 유체와 원통간의 연성 효과는 고려되지 않는다. 따라서 응답특성을 고려한 적용대상의 범위에 대한 연구가 계속 수행되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 5. 참고문헌

1. S.J. Brown, "A Survey of Studies into the Hydrodynamic Response of Fluid-Coupled Circular Cylinders", J. of Pressure Vessel Technology, Vol.104, No.3, 1982
2. S.S. Chen and G.S. Rosenberg, "Dynamics of a Coupled Shell-Fluid System", Nuclear Engineering and Design, Vol. 32, pp.302-310, 1975
3. S.S. Chen and Ho Jung, " Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass Part I : Circular Cylindrical Structure", ANL-CT-76-45, Argonne National Laboratory, 1976
4. M.K. Au-Yang, "Free Vibration of Fluid-Coupled Coaxial Cylindrical Shells of Different Lengths", J. of Applied Mechanics, Vol. 43, pp.480-484, 1976
5. M.K. Au-Yang and J.E. Galford, " A Structural Priority Approach to Fluid-Structure Interaction Problem", Vol. 103, J. of Pressure Vessel Technology, pp.142-150, 1981
6. ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", Sec III, Division 1, Appendix N Dynamic Analysis, N-1450, 1989
7. R.J. Fritz, "The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids", J. of Engineering for Industry, pp.167-173, 1972
8. ASCE, "Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear /structures and Commentary on Standard for Seismic Analysis of Safety Related Nuclear Structures", 1986
9. 김태룡 외 4인, "원자로 내부구조물 동특성 변화에 관한 연구", KAERI/RR-1267/93, 한국원자력연구소, 1993
10. S. Perov, E. Altstadt and M. Werner, "Vibration Analysis of the Pressure Vessel Internals of WWER-1000 Type Reactors with Consideration of Fluid-Structure Interaction", Vo. 27, Annals of Nuclear Energy, pp. 1441-1457, 2000
11. ANSYS, Inc., "ANSYS User's Manual", 1999