

유체 부가질량 및 감쇠 결정시 점성 및 편심 영향에 대한 유한요소해석

Finite Element Analysis for Evaluation of Viscous and Eccentricity Effects on Fluid Added Mass and Damping

구 경 회* 이 재 한**
Koo, Gyeong Hoi Lee, Jae Han

국문요약

일반적으로 유체-구조물 상호작용을 고려한 유체속 구조물들의 지진 및 진동해석에는 주어진 시스템에 대한 유체부가질량을 추정하여 구조물과 연계하는 단순해석 방법을 주로 사용한다. 실제로 유체속 구조물의 응답특성은 유체부가질량 뿐만 아니라 유체점성으로 인한 감쇠영향을 받으며 이들은 모두 연계항을 갖는 복잡한 행렬 형태로 나타난다. 본 연구에서는 비점성 및 점성 유체에 대한 Navier-Stokes 지배방정식의 선형화를 통한 유한요소 정식화를 유도하였다. 이를 이용하여 유한요소 해석 프로그램을 작성하고 6각형 단면특성을 갖는 액체금속로 노심에 대하여 덕트집합체 사이의 유체간격과 레이놀즈수 변화에 따른 유체부가질량과 유체감쇠에 대한 유한요소 해석을 수행한 결과, 유체간격이 줄어들수록 유체부가질량은 유체점성의 영향을 크게 받고 유체감쇠는 점성으로 인하여 레이놀즈수의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 편심을 갖는 동축원통에 대한 유한요소 해석결과, 편심이 증가할수록 유체부가질량은 크게 증가하지만 유체감쇠는 편심이 작은 경우 거의 변화가 없으며 어느 일정 수준이상으로 편심이 커질 경우에는 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어 : 유체-구조물연성, 유체점성, 유체부가질량, 유체감쇠, 노심지진해석

ABSTRACT

In general, simple fluid added mass method is used for the seismic and vibration analysis of the immersed structure to consider the fluid-structure interaction effect. Actually, the structural response of the immersed structure can be affected by both the fluid added mass and damping caused by the fluid viscosity. These variables appeared as a consistent matrix form with the coupling terms. In this paper, finite element formula for the inviscid fluid case and viscous fluid case are derived from the linearized Navier-Stokes equations. Using the finite element program developed in this paper, the analyses of fluid added mass and damping for the hexagon core structure of the liquid metal reactor are carried out to investigate the effect of fluid viscosity with variation of the fluid gap and Reynolds number. From the analysis results, it is verified that the viscosity significantly affects the fluid added mass and damping as the fluid gap size decrease. From the analysis results of eccentricity effect on the fluid added mass and damping of the concentric cylinders, the fluid added mass increase as the eccentricity increases, however the fluid damping increases only when the eccentricity is very severe.

Key words : fluid-structure interaction, fluid viscosity, fluid added mass, fluid damping, core seismic analysis

1. 서 론

일반적으로 액체금속로 노심은 핵연료, 블랭킷, 중성자 차폐체 등으로 이루어진 수백개의 덕트집합체로 구성되어 있으며 모두 소듐 냉각재 속에 잠겨있다. 이들 덕트집합체는 6각형 단면을 가진 얇은 실린더이며 수 mm간격을 갖고 서로 아주 가까이 밀집해 있다.⁽¹⁾ 이들 덕트집합체들 사이에 존재하는 얇은 유체영역은 지진 또는 진동 발생시에 유체관성과 점성으로 인해 유체-구조물 상호작용을 일으키며 응답특성에 크게 영향을 미치게 된다.^{(2),(4)}

실제로 유체-구조물 상호작용이 구조물 응답에 미치는 영향은 구조물 해석시에 유체부가질량 효과만을 고려함으로써 단순히 해결해 왔으며 Fritz 등은 다양한 단면형상에 대한 유체부가질량 계산 공식들을 해석적으로 유도한 바 있다.⁽⁵⁾ 그러나 이러한 공식들은 비점성 유체의 경우에 적용되며 유

동장이 점성으로 인해 복잡하게 되는 점성유체의 경우에는 적용이 곤란하다. 또한 동축원통과 같이 단순한 시스템의 경우에는 점성유체에 대해서도 해석적인 방법으로 엄밀해 등을 구할 수 있으나⁽⁶⁾ 단면형상이 복잡하고 여러 개의 구조물이 유체속에 잠겨 있을 경우에 해석적인 방법으로 유체부가질량을 결정하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 경우에는 유한요소해석법 등과 같은 수치적인 접근법이 매우 유용하다.⁽⁷⁾

본 논문에서는 액체금속로 노심지진해석에 필요한 유체부가질량과 유체감쇠 결정시 유체점성 영향과 편심의 영향을 평가하기 위하여 비점성유체와 점성 유체에 대한 Navier-Stokes 지배방정식의 유한요소 정식화 과정을 각각 유도하고 이로부터 유한요소해석 프로그램을 개발하였다. 유한요소 정식화에는 8절점 사각요소를 사용하였으며 수치해석시 발생할 수 있는 해의 변동(oscillation)을 없애기 위하여 유체속도 변수의 형상함수가 유체압력 변수보다 1차수 높은 혼합형상함수법(mixed interpolation method)⁽⁸⁾를 사용하였다. 해석에 필요한 유한요소 입력자료인 절점좌표와 요소생성 그리고 유체경계 영역의 절점정보 생성 등은 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS⁽⁹⁾의 전처리 기능을 활용하였다.

* 한국원자력연구소, 선임연구원, 공학박사(대표저자 : ghkoo@kaeri.re.kr)

** 한국원자력연구소, 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 12. 31 / 심사종료일 : 2003. 3. 17)

개발된 프로그램을 이용하여 6각형 단면을 갖는 액체금속로의 핵연료 덩트집합체에 대해 점성 및 비점성 유체 해법을 사용한 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과로부터 덩트집합체 간격 변화에 따른 유체부가질량 및 감쇠 해석을 수행하고 덩트집합체 간격변화와 레니놀즈 수에 따른 유체점성 영향을 평가하였다. 또한 동축원통 구조물에 있어서 내부원통과 외부원통 사이에 편심이 존재할 경우에 대해 유한요소 해석을 수행하고 편심이 유체부가질량 및 감쇠에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 지배방정식에 대한 유한요소 정식화

2.1 비점성 유체의 경우

비점성 유체에 잠긴 강체구조물에 대한 유체부가질량은 강체구조물이 조화운동(harmonic motion) 형태의 단위가속도 거동을 할 때 강체와 유체의 경계영역에 발생하는 유체압력을 구함으로서 결정될 수 있다. 이러한 조건들을 만족하는 비압축성, 비점성 유체에 대한 적절한 지배방정식은 강체구조물 주위의 유체영역 V 와 강체구조물과 유체의 경계영역, A 에서의 유체압력을 나타내는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\nabla^2 p = 0, \quad \text{in } V \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_n, \quad \text{on } A \quad (2)$$

위의 식에서 ∇ 는 Laplace 연산자, ρ 는 유체밀도, a_n 은 강체의 법선방향 가속도를 나타내며, 하첨자 n 은 강체와 유체의 경계영역 A 에 법선방향을 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)에 대한 유한요소 정식화를 위하여 강체와 유체의 경계영역에서 임의 값을 갖는 가중함수 p^* 를 사용한 가중잔차법(weighted residual method)을 적용하면 다음과 같은 적분형태를 얻을 수 있다.

$$\int_V (\nabla^2 p) p^* dV = \int_A \left(\frac{\partial p}{\partial n} + \rho a_n \right) p^* dA \quad (3)$$

위의 식 (3)에 대해 Green정리를 적용하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\int_V \frac{\partial p}{\partial n} \frac{\partial p^*}{\partial n} dV = - \int_A \rho a_n p^* dA \quad (4)$$

유체속에 잠긴 강체구조물이 Fig. 1과 같이 주좌표계에 대하여 x_1 또는 x_2 방향으로 조화함수형태의 가속도 거동을 한다고 가정하면 식 (4)에 주어진 유체압력에 대한 해는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(x_i, t) = \sum_{m=1}^M \psi^m(x_i) p^m e^{i\omega t}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

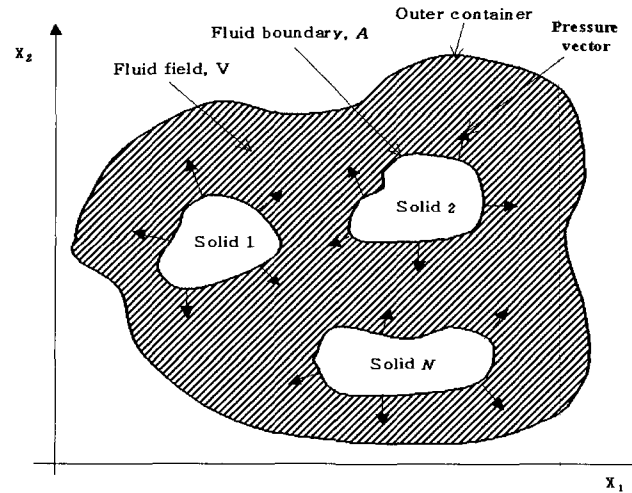


Fig. 1 Two-dimensional fluid field with cross sections of immersed N solid bodies

$$p^*(x_i, t) = \sum_{m=1}^M \psi^m(x_i) p^{*m} e^{i\omega t}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

위의 식에서 M 은 요소의 총절점수를 나타내며 절점좌표 x_i 는 주좌표계 x_1 과 x_2 를 가진다.

식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하면 각 요소(element)에 대한 다음과 같은 최종 적분형태를 구할 수 있다.

$$\left[\int_V \frac{\partial \psi}{\partial x_i} \frac{\partial \psi^T}{\partial x_i} dV \right] p = - \int_A \rho a_n \psi dA \quad (7)$$

본 연구에서는 위의 식 (7)에 대한 유한요소 근사해를 위하여 4절점 사각요소를 사용하였으며 Gauss 구적법을 사용하여 각 요소에 대한 적분을 수행하였다. 구해진 4 X 4 각 요소행렬들은 기존 유한요소기법을 사용하여 전체행렬로 조립된다. 최종적으로 구해진 시스템행렬과 주어진 경계면에서의 단위 가속도벡터로부터 가우스 소거법을 사용하여 유체압력을 계산할 수 있으며 강체구조물에 작용하는 유체부가질량은 경계영역에 작용하는 유체압력을 적분함으로써 결정될 수 있다.

2.2 점성유체의 경우

점성유체에 대한 Navier-Stokes 지배방정식의 유한요소 정식화를 위하여 1) 밀도 ρ 와 동점성(dynamic viscosity) μ 를 갖는 균질 비압축 유체, 2) 강체구조물과 유체가 접하는 경계영역에서 주파수 ω 와 미소 진폭을 갖는 단순 조화진동, 3) 모든 유체영역의 평면거동 등을 가정하였다. 주어진 가정하에서 Navier-Stokes 지배방정식과 연속방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \rho f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

여기서

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9, 10)$$

위의 식 (8)~(10)에서 v_i 는 x_i 방향의 속도성분을 나타내고 f_i 는 체력(body force) 벡터, p 는 압력, τ_{ij} 는 응력텐서 그리고 δ_{ij} 는 Kronecker delta를 나타낸다.

유한요소 정식화를 위하여 v_i^* 를 속도가 주어지는 경계면에서는 영이 되고 그 외에는 임의 값을 갖는 가중함수라고 하고 위의 식 (8)과 곱한 다음에 유체영역 전체에 걸쳐 적분하면 다음과 같은 적분식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \rho v_i^* \frac{\partial v_i}{\partial t} dV = \int_V \rho v_i^* f_i dV + \int_A \tau_{ij} v_i^* n_j dA - \int_V \tau_{ij} \frac{\partial v_i^*}{\partial x_j} dV, \quad i=1, 2 \quad (11)$$

위의 식에서 나타낸 A는 강체구조물과 유체가 접하는 유체 경계 영역을 나타낸다.

유체경계 영역, A에서 임의 값을 갖는 가중함수, p^* 를 식 (10)과 곱하고 유체영역 전체에 걸쳐 적분하면 다음과 같은 적분식을 얻을 수 있다.

$$\int_V p^* \frac{\partial v_i}{\partial x_i} dV = 0 \quad (12)$$

식 (9)를 식 (11)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \rho v_i^* \frac{\partial v_i}{\partial t} dV - \int_V p \frac{\partial v_i^*}{\partial x_j} \delta_{ij} dV + \int_V \mu \frac{\partial v_i^*}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) dV = \int_V \rho v_i^* f_i dV + \int_A \tau_{ij} v_i^* n_j dA \quad (13)$$

유한요소 정식화를 위하여 유체속도와 압력변수가 각 요소마다 다음과 같은 근사해를 갖는다고 가정한다.

$$v_i(x,t) = \sum_{n=1}^N \phi^n(x) v_i^n e^{i\alpha t}, \quad p(x,t) = \sum_{m=1}^M \psi^m(x) p^m e^{i\alpha t} \quad (14, 15)$$

위의 식에서 ϕ 와 ψ 는 각각 유체속도와 압력에 대한 형상함수를 나타내고 상첨자 m 과 n 은 각각 절점 m 과 n 에서의 국부 절점값 임을 나타낸다. 그리고 N 과 M 은 각각 형상함수 ϕ 와 ψ 의 총 형상함수 개수를 나타낸다.

같은 방법으로 가중함수 v_i^* 와 p_i^* 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$v_i^*(x,t) = \sum_{n=1}^N \phi^n(x) v_i^{*n} e^{i\alpha t}, \quad p^*(x,t) = \sum_{m=1}^M \psi^m(x) p^{*m} e^{i\alpha t} \quad (16, 17)$$

식 (14)~(17)을 식 (12)와 (13)에 대입하면 정리하면 각 요소에 대하여 다음 식과 같은 행렬형태의 선형화된 Navier-Stokes 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 2A_{11} + A_{22} + i\omega G & A_{21} & -C_1 \\ A_{12} & A_{11} + 2A_{22} + i\omega G & -C_2 \\ -C_1^T & -C_2^T & \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (18)$$

여기서

$$A_{11} = \left[\int_V \mu \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \frac{\partial \phi^T}{\partial x_1} dV \right]_{N \times N},$$

$$A_{22} = \left[\int_V \mu \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \frac{\partial \phi^T}{\partial x_2} dV \right]_{N \times N}$$

$$A_{21} = A_{12}^T = \left[\int_V \mu \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \frac{\partial \phi^T}{\partial x_1} dV \right]_{N \times N},$$

$$G = \left[\int_V \rho \phi \phi^T dV \right]_{N \times N}$$

$$C_1 = \left[\int_V \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \psi^T dV \right]_{N \times M}, \quad C_2 = \left[\int_V \frac{\partial \phi}{\partial x_2} \psi^T dV \right]_{N \times M}$$

$$F_1 = \left[\int_V \rho \phi f_1 dV + \int_A \phi (\tau_{11} n_1 + \tau_{12} n_2) dA \right]_N$$

$$F_2 = \left[\int_V \rho \phi f_2 dV + \int_A \phi (\tau_{21} n_1 + \tau_{22} n_2) dA \right]_N$$

위의 식 (18)에 유도된 강성행렬은 정방형(square), 대칭(symmetric), 복소(complex) 행렬이며 indefinite하다. 본 연구에서는 주어진 유체영역을 수렴과 적합성 조건들이 충분한 C^0 -type 8절점quadratic quadrilateral 요소로 이산화 하였다. 식 (18)에 나타난 것과 같이 지배방정식에서 유체속도 변수에 대한 미분차원은 압력변수에 비하여 1차원 높게 나타난다. 이 경우에 속도와 압력에 대한 형상함수의 차원을 같게 하면 식 (18)의 해를 구하는데 있어서 수치적 변동이 발생하게 된다. 이러한 현상을 피하기 위하여 본 연구에서는 혼합형상함수법⁽⁸⁾을 사용하였다. 따라서 Fig. 2와 같이 유체압력 변수에 대한 형상함수는 4군데 꼭지 절점에서만 정의되고 유체속도 변수에 대한 형상함수는 모든 절점에서 정의되며 요소당 자유도는 20개가 된다

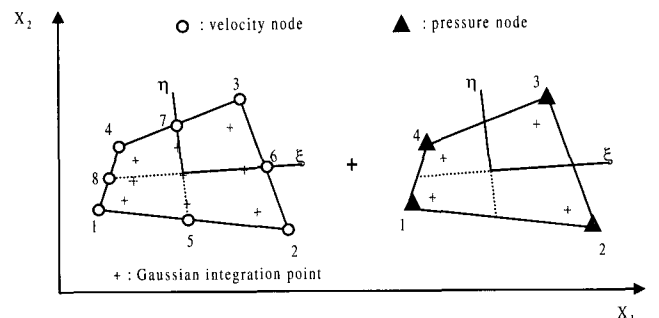


Fig. 2 Used C^0 8-nodes quadratic quadrilateral element for mixed interpolation method

2.3 유체부가질량 및 감쇠 계산방법

유체속에 잠긴 강체구조물 들에 작용하는 유체부가질량과 감쇠는 먼저 하나의 강체가 단위크기의 진동을 하고 나머지 다른 강체들은 정지해 있는 조건하에서 결정될 수 있다. 이때 각 강체들은 자체 진동시 야기되는 열수력학적 반력과 다른 강체들의 진동에 의해 발생하는 반력을 가지게 된다. 따라서 계산되는 유체부가질량과 감쇠는 복잡한 연계항(coupling terms)을 갖는 행렬형태로 나타난다.

강체의 단위진동시에 체력항과 유체경계 영역에서의 전단력은 무시될 수 있으며 따라서 식 (18)에서 F_1 과 F_2 는 영이다. 강체구조물에 작용하는 유체부가질량과 감쇠를 구하기 위하여 조화진동하는 강체와 접하는 유체경계 영역에 다음과 같은 단위속도를 부가한다.

$$v_i = U_i e^{i\omega t} \text{ on fluid boundary at moving body}$$

$$v_i = 0 \text{ on all remaining fluid boundaries}$$

최종적으로 각 강체 구조물에 작용하는 수력학적 반력은 식 (9)로부터 유체경계 영역을 따라서 다음 식과 같이 적분함으로써 결정된다.

$$R_i = \int_A \tau_{ij} n_j dA = \int_A \left\{ -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\} n_j dA \quad (19)$$

식 (19)로 부터 구해진 반력은 복소수 값을 가지며 따라서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_i = Q_i \cos \omega t + i P_i \sin \omega t \quad (20)$$

위의 식 (20)에서 허수부인 $P_i \sin \omega t$ 는 가속도와 위상을 같이하는 성분이며 실수부인 $Q_i \cos \omega t$ 는 속도와 위상을 같이하는 성분이다. 따라서 이들 성분들로 부터 유체부가질량 M_f 와 감쇠 C_f 는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$M_f = \frac{P}{\omega U}, \quad C_f = \frac{Q}{U} \quad (21, 22)$$

한정된 점성유체 속에 잠긴 N개의 강체구조물을 갖는 시스템에 대하여 유체부가질량 및 감쇠행렬을 구하기 위해서는 $2(N+1)$ 번의 해를 구하는 과정이 수행되어야 하며 식 (19)을 이용한 $4(N+1)^2$ 번의 적분이 요구된다.

유체부가질량과 감쇠에 대한 무차원적인 특성평가를 위하여 다음과 같은 유체부가질량 계수, C_m 과 유체감쇠 계수, C_v 을 정의할 수 있다.

$$C_m = \frac{P}{\rho A \omega U}, \quad C_v = \frac{Q}{\rho A \omega U} \quad (23, 24)$$

Fig. 3은 위에서 기술한 유체부가질량 및 감쇠를 결정하는

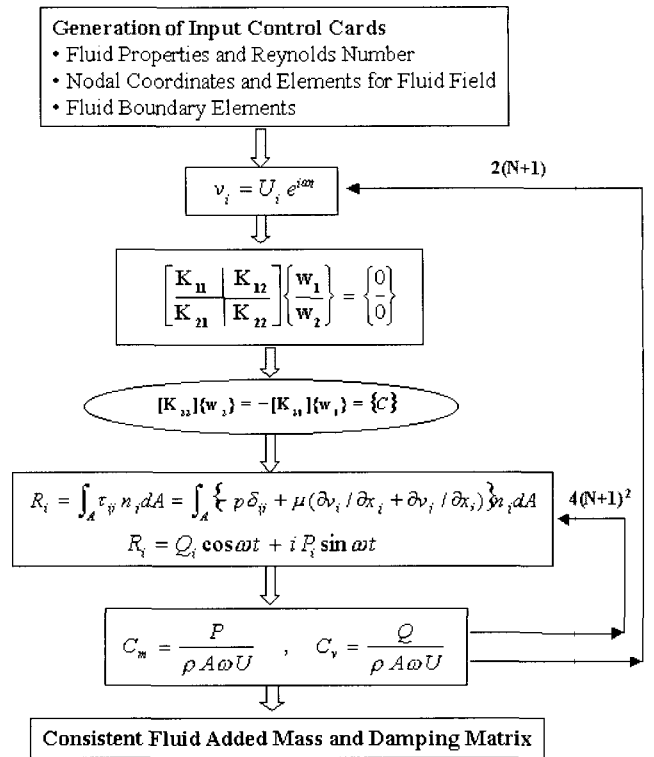


Fig. 3 Procedures calculating fluid added mass and damping by finite element analysis

방법에 대한 전반적인 흐름도를 나타낸 것이다.

3. 유체부가질량 및 감쇠 유한요소 해석

3.1 유체점성 영향평가

본 연구의 적용 예로서 사용된 유체속 구조물은 액체금속로 노심을 구성하는 6각형 실린더로서 내부에 핵연료봉들이 채워지는 덕트집합체이다. 해석에 사용된 점성유체의 동점성은 상온(21°C)에서 $\mu=9.54 \times 10^{-4} \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, 밀도는 $\rho=1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 이다.

해석에 사용된 6각형 덕트집합체의 직경(Flat-to-Flat)은 $d=15 \text{cm}$ 이며 덕트와 외부원통의 직경비는 $D/d=\sqrt{3}$ 이다. Fig. 4는 유체점성 영향을 평가하기 위하여 사용된 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다. 해석모델은 외부원통에 둘러

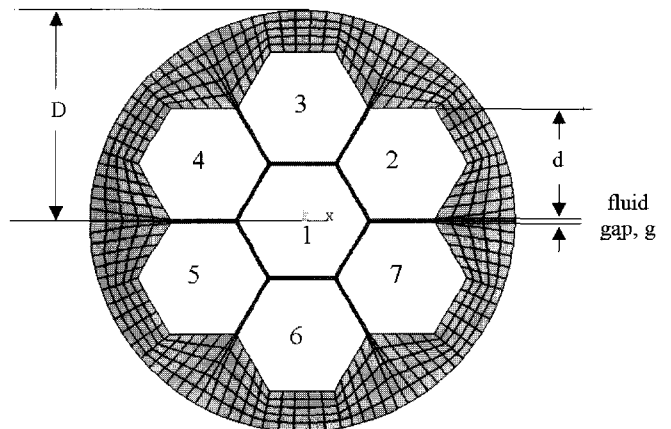


Fig. 4 Finite element model of 7-hexagons system

싸인 총 7개의 덕트집합체로 구성되어 있으며 해석에 필요한 절점좌표 생성과 요소 생성은 상용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 5.6를 사용하였다.

Fig. 5는 레이놀즈수 $Re = \rho(\omega d^2 / \mu) = 500$ 인 경우에 대하여 덕트집합체 간격비(=g/r)에 따른 중심부 덕트집합체(1번)의 유체부가질량 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 덕트간의 유체간격이 작아지면 유체부가질량 계수, C_m 이 급격히 증가하고 유체간격이 어느 정도 커지면 유체부가질량은 일정수준으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 이때 유체간격이 작아질 수록 점성을 고려한 해와 점성을 고려하지 않은 해의 차가 점점 커지며 비점성 유체를 가정한 해법은 점성유체를 가정한 해법에 비하여 유체부가질량을 저평가하는 결과를 나타내었다. 즉, 유체간격이 작아 질수록 유체점성 영향이 점점 크게 발생함을 의미한다. 실제로 액체금속로 노심 덕트집합체간의 간격은 1.0~4.0mm 정도로 설계되며 이 경우 유체점성의 영향이 지진 및 진동 응답특성에 크게 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.^{(3),(4),(7)}

Fig. 6은 유체간격에 따른 중심부 덕트집합체(1번)의 유체감쇠계수, C_v 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 유체감쇠는 덕트 사이의 간격변화에 민감하며 덕트 간격이

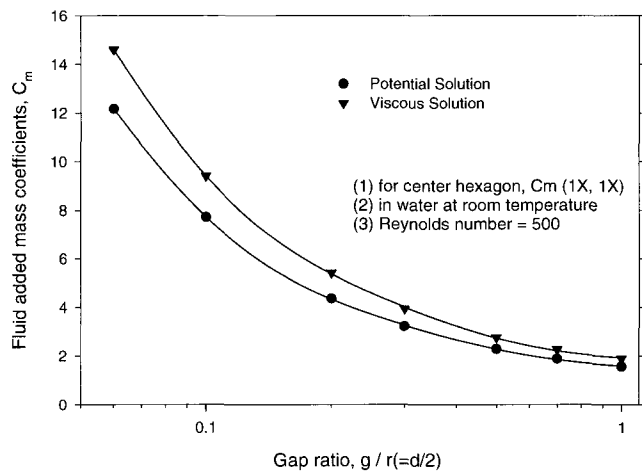


Fig. 5 Fluid added mass coefficient vs. fluid gap ratio for 7-hexagon system

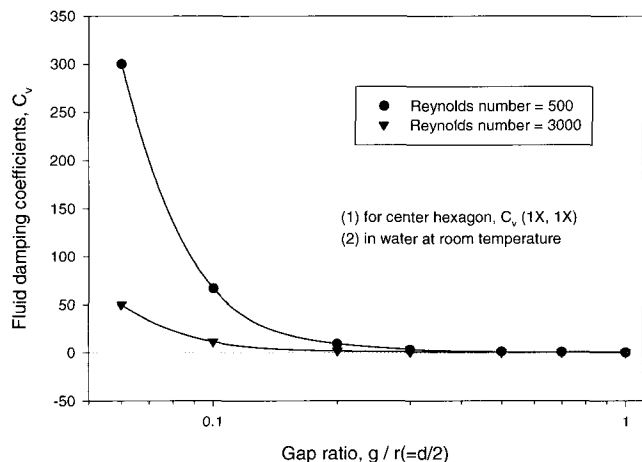


Fig. 6 Fluid damping coefficients vs. fluid gap ratio for 7-hexagon system

어느 정도 커지면 유체감쇠는 영에 접근한다. 또한 유체간격이 작아질수록 유체감쇠는 레이놀즈수에 민감하며 레이놀즈수가 작을수록 유체감쇠가 급격히 증가함을 알 수 있다. 즉, 유체속 구조물의 진동속도가 느릴수록 유체감쇠 효과가 커지고 빠를수록 유체감쇠 효과가 사라짐을 의미한다. 이는 유체 속에 잠긴 구조물이 빠른 운동을 할 경우 구조물과 유체 경계부위에서의 유동이 난류에 가까워지면서 유체-구조물 상호작용 효과가 감소하기 때문이다.

Table 1은 유체간격비 $g/r=0.06$, 레이놀즈수 $Re=500$ 인 경우에 대한 X₁방향의 유체부가질량 계수, C_m 평가결과를 나타낸 것이며 Table 2는 유체감쇠계수, C_v 평가결과를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 각 덕트집합체에 대한 유체부가질량과 감쇠는 비 대각선 부에 연계항(coupling terms)를 갖는 행렬로 표현되며 주위가 모두 덕트집합체로 둘러싸인 중심부 덕트집합체(1번)에서의 유체부가질량과 감쇠가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 1 Fluid added mass coefficient, C_m of 7-hexagon system

	1-x	2-x	3-x	4-x	5-x	6-x	7-x
1-x	14.6						
2-x	-3.6	8.6					
3-x	3.1	-1.6	5.7				
4-x	-3.6	-2.0	-1.6	8.6			
5-x	-3.6	-0.8	0.3	3.6	8.6		
6-x	3.1	0.2	0.8	0.2	-1.6	5.7	
7-x	-3.6	3.6	0.3	-0.8	-2.0	-0.5	8.6

Table 2 Fluid damping coefficient, C_v of 7-hexagon system

	1-x	2-x	3-x	4-x	5-x	6-x	7-x
1-x	300.						
2-x	-95.0	151.					
3-x	40.6	-41.4	49.8				
4-x	-95.0	-44.7	-38.9	151.			
5-x	-95.0	-23.1	-5.7	59.1	151.		
6-x	40.6	-5.9	2.1	-5.9	-41.4	49.8	
7-x	-95.0	59.1	-5.7	-23.1	-44.7	-38.9	151.

3.2 동축원통의 편심 영향평가

유체속에 잠긴 동축 원통실린더에 있어서 내부원통과 외부원통 사이에 Fig. 7과 같이 편심, $e=k(R_2-R_1)$, $0 \leq k \leq 1.0$ 이 존재할 경우 유체부가질량 및 감쇠에 미치는 영향을 평가하였다. 해석에 사용된 동축 원통실린더의 내부원통 직경은 15cm이며 내부원통과 외부원통의 직경비는 $D/d = \sqrt{3}$ 이다. Fig. 8은 해석에 사용된 편심을 갖는 원통구조물의 유한요소 해석모델을 나타낸 것이다.

Fig. 9는 편심의 변화에 따른 내부원통 구조물의 유체부가질량 해석결과를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 k가 0.2 이하인 편심에 대해서는 유체부가질량 변화가 거의 발생하지 않

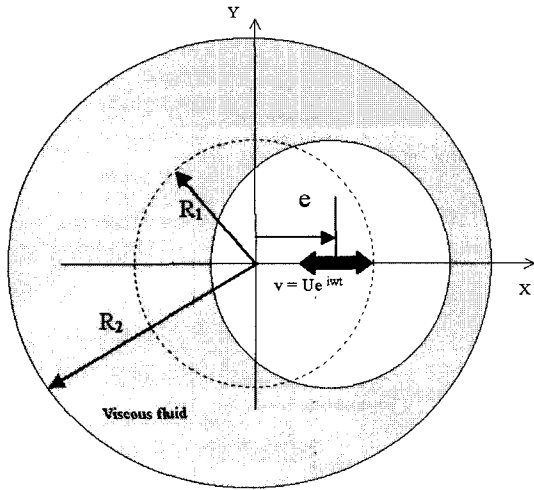


Fig. 7 Concept of eccentric cylinder

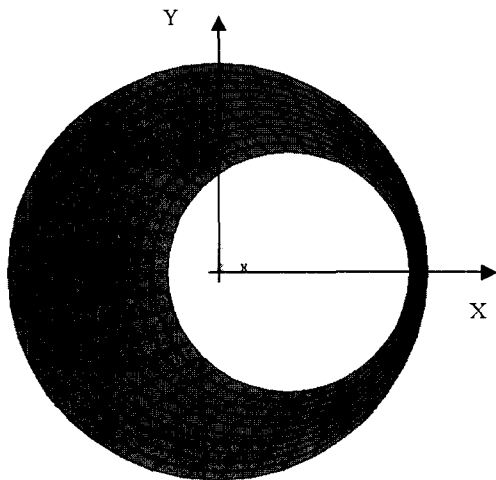


Fig. 8 Finite element model of eccentric cylinders

으나 편심이 매우 커져 내부원통이 외부원통에 접근할 수록 내부원통에 작용하는 유체부가질량은 급격히 증가함을 알 수 있다. 이때 편심이 극단적으로 가정되는 $k=0.9$ 를 제외하고 X, Y 방향의 유체부가질량은 편심 정도에 따라서 거의 동일하게 발생한다.

Fig. 10은 편심의 변화에 따른 내부원통 구조물의 유체감쇠 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 $k=0.5$ 보다 작은 편심에 대해서는 유체감쇠의 변화가 거의 발생하지 않으나 이보다 클 경우 유체감쇠가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 특히 편심이 극단적으로 가정된 $k=0.9$ 에서는 X, Y 방향의 유체감쇠가 크게 차이가 나는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 액체금속로 노심지진해석에 필요한 유체 부가질량과 유체감쇠 결정시 유체점성 영향과 편심의 영향을 평가하기 위하여 비점성 및 점성 유체에 대한 Navier-Stokes 지배방정식의 선형화를 통한 유한요소 정식화를 유도하였다. 이를 이용하여 6각형 단면특성을 갖는 액체금속로 노심에 대하여 덕트집합체 간격비에 따른 유체부가질량 및 감쇠 해석을 비점성 유체에 대한 해법과 점성유체에 대한 해법을

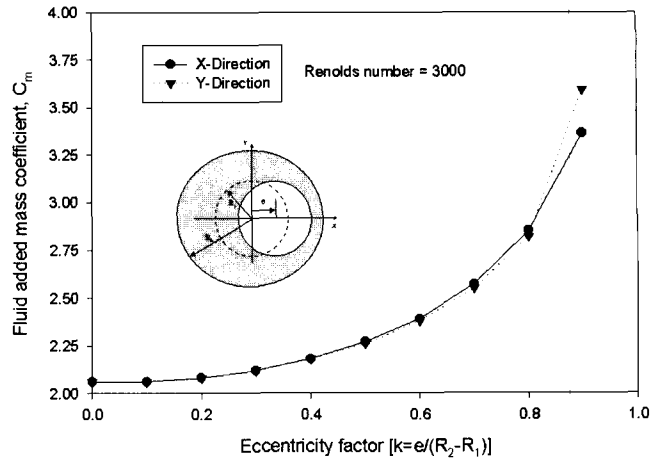


Fig. 9 Eccentric effect on fluid added mass

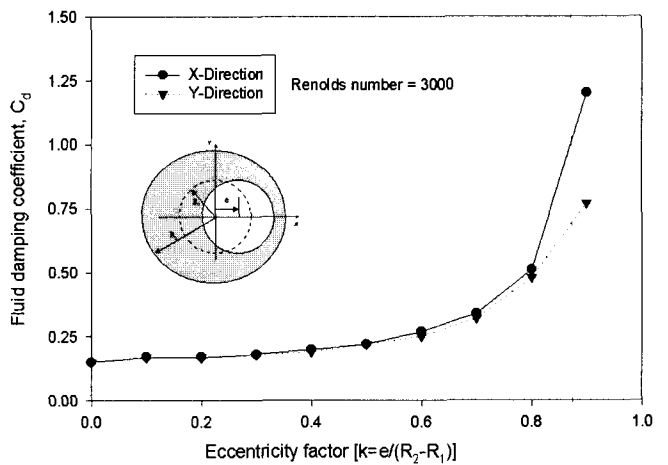


Fig. 10 Eccentric effect on fluid damping

각각 적용하였다. 해석결과 덕트집합체 사이의 유체간격이 줄어들수록 유체부가질량은 유체점성의 영향을 크게 받고 유체감쇠는 간격비가 작아질수록 증가하며 레이놀즈수의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 편심을 갖는 동축원통에 대한 유한요소 해석결과 유체부가질량은 편심이 커질수록 크게 증가하며 유체감쇠는 어느 수준 이하의 편심에서는 변화가 아주 작다가 일정수준을 넘어서면 크게 증가하는 것으로 나타났다. 본 논문의 결과들로부터 유체부가질량 및 감쇠는 유체 점성의 영향에 의해 유체간격이 작을수록 크게 영향을 받으며 일정 수준이상의 편심에도 영향을 받기 때문에 유체속 구조물들의 지진 또는 진동해석시에 유체점성과 편심을 고려한 유체영향을 반드시 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Koo, G. H., Lee, H. Y., and Yoo, B., "Seismic isolation

- effects on core seismic responses of KALIMER," *SMIRT-15 Conference*, Vol. 9, 1999, pp. 351-358.
2. 구경희, 이재한, "유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동 특성 및 지진응답에 대한 유체부가질량영향," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제5호, 2001, pp. 25-33.
 3. Su, T. C., "The effect of viscosity on the forced vibrations of fluid-filled elastic shell," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, 1983, pp. 517-524.
 4. Mulcahy, T. M., "Fluid forces on rods vibrating in finite length annular regions," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, 1980, pp. 234-240.
 5. Fritz, R. J., "The effect of liquids on the dynamic motions of immersed solids," *Journal of Engineering for Industry*, Transactions of the ASME, 1972, pp. 167-173.
 6. Chen, S. S., Wambsganss, M. W., and Jendrzejczyk, J. A., "Added mass and damping of a vibrating rod in confined viscous fluid," *Journal of Applied Mechanics*, 1976, Vol. 98, pp. 325-329.
 7. Yang, C. I. and Moran, T. J., "Calculations of added mass and damping coefficients for hexagonal cylinders in a confined viscous fluid," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 102, 1980, pp.152-157.
 8. Zienkiewicz and Taylor, *The Finite Element Method, Fourth Edition, Volume 2, Solid and Fluid Mechanics, Dynamics and Non-linearity*, McGRAW-HILL, 1991.
 9. ANSYS User's Manual for Revision 5.6, Volume I, II, III.