

유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동특성 및 지진응답에 대한 유체부가질량 영향

Effect of Fluid Added Mass on Vibration Characteristics and Seismic Responses of Immersed Concentric Cylinders

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

국문요약

현재 국내에서 개발중인 액체금속로 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석을 위하여 원자로내부에 존재하는 소듐냉각재의 유체-구조물 상호작용을 고려한 단순지진해석 모델링 개발이 필수적이다. 이를 위하여 본 논문에서는 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 유체부가질량에 대한 이론적 배경을 검토하였으며 기존의 유체부가질량법을 고려하여 시간이력 지진응답해석을 수행할 수 있는 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘을 사용한 해석코드를 개발하였다. 개발된 지진해석코드를 사용하여 유체속에 잠긴 두개의 동축원통 구조물의 진동특성과 지진응답에 대한 유체부가질량의 영향을 살펴보았다. 적용예로서 두개의 동축원통에 대한 단순지진해석모델을 가정하고 유체부가질량을 고려한 진동특성해석과 지진응답해석을 수행한 결과 유체가 채워진 동축원통 구조물은 유체와의 상호작용으로 인하여 구조물의 진동특성과 지진응답특성이 크게 영향을 받으며 지진응답해석시 연계항을 포함한 유체부가질량의 영향을 신중하게 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 유체-구조물 상호작용, 동축원통, 유체부가질량, 연계진동, 지진응답해석

ABSTRACT

For the seismic design and analysis of LMR(liquid metal reactor) being developed in Korea, it is necessary to develop the simple seismic analysis model including the fluid-structure interaction effects. In this paper, the theoretical backgrounds for the fluid added mass of the immersed concentric cylinders are investigated and the seismic analysis code using the Runge-Kutta algorithm, which can consider the fluid added mass matrix in system matrix, are developed to perform the time history seismic analysis. From the coupled modal analysis and the seismic analysis for the simple immersed concentric cylinders, it is verified that the fluid added mass significantly affect the vibration characteristics and the seismic responses. Therefore the fluid coupled effects should be carefully considered in seismic response analysis of the immersed concentric cylinders.

Key words : fluid-structure interaction, concentric cylinder, fluid added mass, coupled vibration, seismic response analysis

1. 서 론

소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로는 기존의 경수로 또는 중수로 원자로와 비교하면 원자로의 구조측면에서 매우 상이한 특징을 가지고 있다. 일반적으로 경수로 원자로가 350℃, 150bar 정도에서 운전되는 것에 비하여 액체금속 원자로로는 530℃, 5bar의 고온/저압의 운전조건을 가지고 있다. 액체금속로는 고온운전조건에서 발생할 수 있는 과도한 열응력을 최소화 하기 위해 원자로용기를 비롯하여 내부구조물들은 대부분 5cm이하의 박막구조물로 설계된다.⁽¹⁾ 이러한 박막구조물들은 열응력에는 유리하나 지진하중에는 매우 취약할 수 있으며 특히 원자로내부에 채워진 소듐냉각재는 박막구조물과의 복잡한 유체-구조물 상호작용을 나타낼 수 있다.

원자로구조물에 있어서 원자로용기와 주요 내부구조물들은 대부분 동축원통 구조물 형상이며 일차냉각재와 접하고 있다. 그러나 실제로 원자로구조물은 Fig. 1과 같이 내부형상이 매우 복잡하며 이들 구조물과 냉각재 간의 유체-구조

물 상호작용을 고려한 시간이력 지진응답해석을 위하여 상세 유한요소 해석모델을 사용하는 것은 매우 복잡하고 해석시간이 굉장히 많이 소요된다. 따라서 현재 원자로구조물의 시간이력 지진응답해석에는 질량-스프링 요소들로 구성된 단순지진해석모델을 많이 사용하고 있으며 원자로 내부의 냉각재는 유체부가질량으로 모델링하는 방법들을 사용하고 있다.⁽²⁾ 유체속에 잠긴 여러가지 구조물에 있어서 유체부가질량 행렬을 유도하는 연구는 Fritz를 포함한 많은 연구자들에 의해 연구된 바 있으며⁽³⁾⁽⁴⁾ 이들의 연구결과들은 미국 ASCE (American society of civil engineers)에서 제안한 안전성관련 원자로구조물의 지진해석 기준⁽²⁾에 포함되어 있다. 그러나 실제로 이러한 기준은 내부원통과 외부원통을 하나의 절점으로 가정한 매우 단순한 유체부가질량행렬이며 이들 기준을 다자유도계를 갖는 지진해석모델에 적용하기 위해서는 해석구조물의 종류에 따라서 많은 검토가 요구된다. 특히 다자유도계를 갖는 동축원통 구조물의 질량-스프링 단순지진해석모델에 대해 내부원통과 외부원통 각 절점에 유체와의 상호작용을 고려한 유체부가질량 행렬을 고려할 수 있는 지진해석방법이 필요하다.

액체금속로 지진해석에 대한 이전의 연구에서는 원자로 내부 소듐냉각재를 동축원통간의 상호작용을 고려하지 않은

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

** 한국원자력연구소 책임연구원 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 4. 11 / 심사종료일 : 2001. 8. 3)

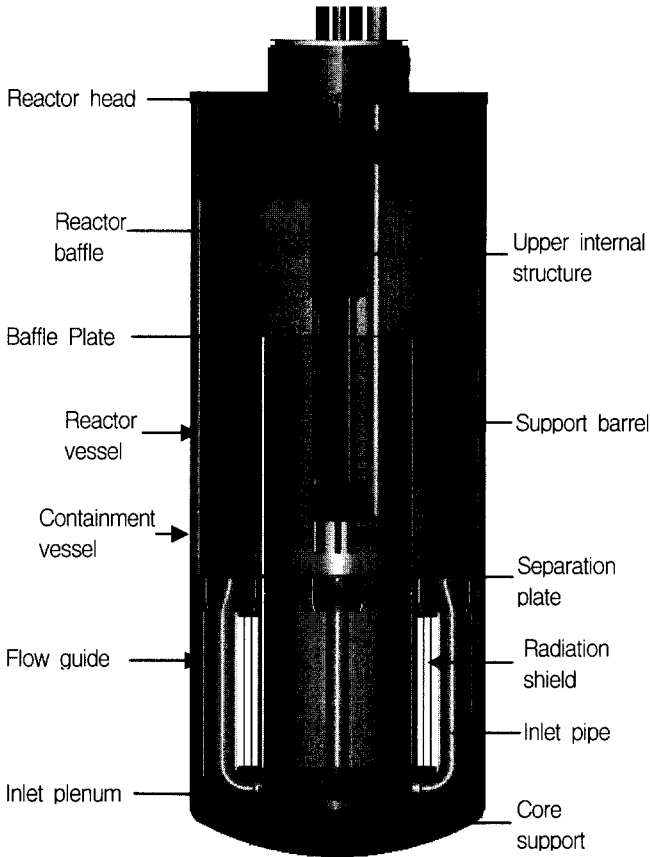


Fig. 1 Reactor structures of LMR(KALIMER 150MWe)

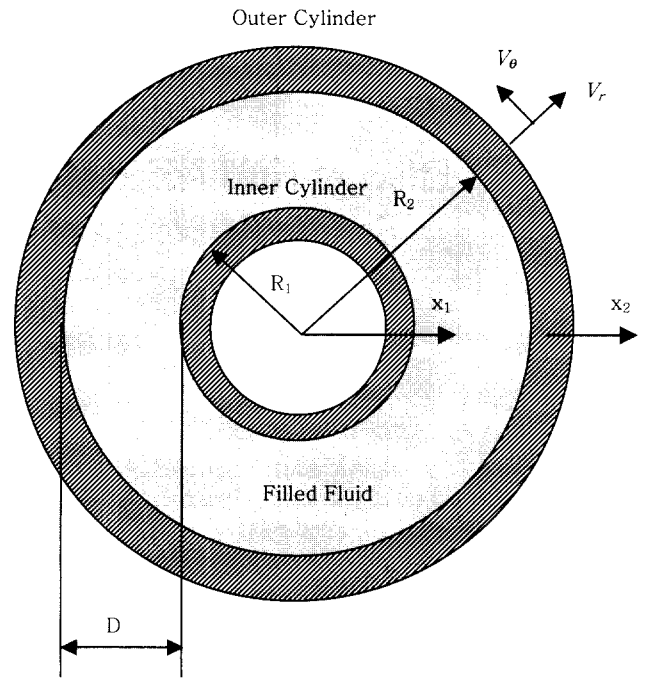


Fig. 2 Concentric cylinders filled with fluid in annulus

단순 유체부가질량으로만 고려한 지진해석모델이 사용된 바가 있다.⁽⁶⁾ 실제로 액체금속로 원자로내부에 있는 일차 소듐 냉각재에 의한 유체연계(fluid coupling) 작용은 박막인 내부구조물간의 연계진동(coupled vibration)을 야기할 수 있고 이러한 영향은 지진응답에 영향을 미칠 수가 있다. 따라서 유체속에 잠긴 박막구조물은 유체연계에 의한 구조물간의 연계진동이 크게 발생할 수 있기 때문에 이를 고려할 수 있는 보다 개선된 지진해석모델이 필요하다.

이를 위하여 본 논문에서는 유체속에 잠긴 두개의 동축원통 구조물에 대한 유체부가질량의 이론적 배경을 검토하고 유도된 유체부가질량 행렬을 포함하는 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘을 사용한 시간이력 지진해석코드를 개발하였다. 개발된 해석코드를 사용하여 유체속에 잠긴 동축원통 구조물에 대하여 외부원통 강성변화에 대한 영향, 동축원통의 환형공간 간격에 대한 영향 그리고 유체부가질량행렬에 있어 비대각성 행렬성분인 연계항(coupling terms)의 영향 등을 고려한 연계진동모우드해석 및 지진응답해석을 수행하여 유체부가질량이 진동특성과 지진응답에 미치는 영향을 살펴 보았다.

2. 유체연계를 갖는 동축원통 구조물의 지진해석 공식화

2.1 동축원통에 작용하는 유체부가질량

Fig. 2에서와 같이 두개의 동축원통 사이에 환형유체가 채워진 구조물의 내부원통 외반경을 R_1 , 외부원통의 내반경을

R_2 그리고 원통길이를 L 이라고 하고 원통길이 L 은 외부원통의 내반경 R_2 에 비하고 매우 크다고 가정한다. 이때 내부원통의 속도를 \dot{x}_1 , 외부원통의 속도를 \dot{x}_2 라 하고 상대변위 $(x_2 - x_1)$ 가 $(R_2 - R_1)$ 에 비하여 매우 작다고 가정하면 다음과 같이 속도포텐셜 ϕ 를 정의할 수 있다.

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

$$V_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (2)$$

위의 식에서 V_r 은 반경방향 유체속도이고 V_θ 는 원주방향 유체속도를 나타낸다.

두개의 동축원통 사이에 채워진 환형유체의 마찰을 무시하고 동축원통이 정지해 있을 때 유체도 정지해 있다고 가정하면 유체를 비회전성이라고 볼 수 있으며 이때 속도포텐셜 ϕ 는 단일값을 갖는다고 할 수 있다. 따라서 경계조건들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} = \dot{x}_1 \cos \theta \quad \text{at } r = R_1 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} = \dot{x}_2 \cos \theta \quad \text{at } r = R_2 \quad (4)$$

유체의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = 0 \quad (5)$$

위의 식 (5)의 해를 다음과 같이 정의한다.

$$\phi = f(r) \cos \theta \quad (6)$$

위의 식 (6)을 식 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 특성 식을 얻게 된다.

$$r^2 f'' + rf' - f = 0 \quad (7)$$

식 (7)에서 (')는 변수 r 에 대한 미분을 나타낸다. 특성식 (7)에 대한 해로부터 식 (1)과 식 (2)에 주어진 유체의 속도는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$V_r = \left(\frac{B}{r^2} - A \right) \cos \theta \quad (8)$$

$$V_\theta = \left(\frac{B}{r^2} + A \right) \sin \theta \quad (9)$$

여기서

$$A = \frac{\dot{x}_1 R_1^2 - \dot{x}_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (10)$$

$$B = \frac{R_2^2 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (11)$$

이다. 위의 해에서와 같이 각 유체입자의 속도는 각 원통구조물의 거동에 의해 유일하게 결정됨을 알 수 있으며 비회전 거동을 하는 비마찰, 불압축성 유체는 위치에너지를 가지지 않으며 관성 Lagrangian 계로 간주될 수 있다. 따라서 관성계에 있어서 유체반력 F_{fi} 는 다음과 같은 Lagrange 방정식으로 주어질 수 있다.

$$F_{fi} = - \frac{d}{dt} \frac{\partial T_f}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial T_f}{\partial x_i} \quad (12)$$

위의 식 (12)에서 x_i (원통 i)는 각 원통거동을 나타내는 일반화된 좌표이고 T_f 는 유체운동에너지를 나타낸다.

위의 식 (12)에서 각 원통의 거동이 두 원통사이에 채워진 환형유체의 두께보다 작다고 가정할 때 식의 오른쪽편 두번째항은 무시할 수 있다.⁽³⁾ 이러한 가정으로부터 식 (12)는 다음과 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$F_{fi} = - \frac{d}{dt} \frac{\partial T_f}{\partial \dot{x}_i} \quad (13)$$

유체운동에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_f = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho_f r L dr d\theta (V_r^2 + V_\theta^2) \quad (14)$$

따라서 식 (8), 식 (9), 식 (13) 그리고 식 (14)로부터 각 원통에 작용하는 유체반력은 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$F_{f1} = \alpha M_1 \ddot{x}_1 - (1 + \alpha) M_1 \ddot{x}_2 \quad (15)$$

$$F_{f2} = - (1 + \alpha) M_1 \ddot{x}_1 + [(1 + \alpha) M_1 + M_2] \ddot{x}_2 \quad (16)$$

여기서

$$M_1 = \rho_f \pi R_1^2 L \quad (17)$$

$$M_2 = \rho_f \pi R_2^2 L \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (19)$$

위의 식 (15)와 식 (16)에서와 같이 두개의 동축원통 사이에 유체가 존재할 경우에 유체연계로 인하여 각 원통구조물의 동적거동은 상호 연계됨을 알 수 있고 이러한 유체연계 작용은 유체부가질량으로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

2.2 유체연계를 고려한 동축원통의 거동특성

본 논문에서는 유체 속에 잠긴 동축원통 구조물에 대한 지진응답시 유체연계를 고려하기 위하여 앞에서 기술한 유체부가질량접근법을 사용하였다. Fig. 2와 같이 직경이 다른 두개의 동축원통 사이에 유체가 채워져 있을 경우 주어진 시스템에 대한 지진운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

여기서 m_1 과 m_2 는 각 원통 구조물의 질량, k_1 과 k_2 는 강성을 나타내며 x_1 과 x_2 는 일반화된 좌표를 각각 나타낸다. 식 (20)에서 세번째 항은 각 원통에 작용하는 유체의 지진반력을 나타내는 것으로서 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽³⁾

$$\begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha M_1 & -(1 + \alpha) M_1 \\ -(1 + \alpha) M_1 & (1 + \alpha) M_1 + M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} \quad (21)$$

위의 식에서 \ddot{x}_g 는 입력지진동 가속도를 나타낸다. 따라서 식 (20)과 식 (21)을 정리하면 다음과 같은 유체연계를 고려한 지진운동방정식을 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} m_1 + \alpha M_1 & -(1 + \alpha) M_1 \\ -(1 + \alpha) M_1 & m_2 + (1 + \alpha) M_1 + M_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = - \ddot{x}_g \begin{Bmatrix} m_1 - M_1 \\ m_2 + M_2 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

위의 식 (22)의 왼쪽 유체부가질량 행렬에서 대각선행렬 외에 발생하는 유체부가질량 항은 유체연계에 의하여 외부 원통과 내부원통 간의 연계거동이 존재함을 나타낸다. 이러한 연계거동은 식 (22)에서 알 수 있듯이 각 원통구조물과의 에 대한 질량항들이 서로 반대부호를 가짐으로써 1차 고유진동형상은 서로 반대방향의 위상을 가지는 동적거동을

나타냄을 알 수 있다.

실제적인 적용 예로써 외부원통이 내부원통에 비하여 상대적으로 매우 강성이 큰 경우에는 외부원통의 거동을 강제($x_2=0$)로 가정할 수 있으며 이때 유체에 잠겨있는 내부원통의 지진운동방정식은 위의 식 (22)로 부터 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$(m_1 + \alpha M_1)\ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -(m_1 - M_1)\ddot{x}_g \quad (23)$$

위의 식 (23)에서 외부원통과 내부원통의 간격(R_2-R_1)이 줄어들수록 α 는 점점 커지며 극단적인 경우 무한대 값을 갖게 된다. 따라서 내부원통은 두 원통간의 간격크기에 따라서 유체부가질량(즉, αM_1)의 영향이 매우 크게 나타나며 고유진동수 변화에 크게 영향을 미칠 수 있다. 유체부가질량으로 인한 고유진동수의 감소는 다음과 같은 주파수감소계수로 정의할 수 있다.

$$D_f = \frac{f_{fluid}}{f_{air}} = \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + \alpha M_1}} \quad (24)$$

또한 유체속에 잠겨있는 물체는 유체부가질량 효과로 인하여 가진 지진하중이 감소하는 결과를 나타낸다. 식 (23)의 오른쪽 항에 나타난 바와 같이 구조물을 가진하는지진하중이 내부원통의 부력, 즉 $\rho_f \pi R_1^2 L$ 만큼 감소하는 결과를 나타낸다. 이러한 효과는 두 원통 구조물 사이의 간격크기와는 무관함을 알 수 있으며 다음 식과 같이 지진하중 감소계수로 표현될 수 있다.

$$D_e = \frac{m_1 - M_1}{m_1 + \alpha M_1} \quad (25)$$

2.3 Runge-Kutta 수치해석법을 사용한 지진해석 공식화

지진하중에 대한 일반적인 운동방정식은 질량, 감쇠 그리고 강성행렬을 이용한 이산화된 형태로 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}_r\} + [C]\{\dot{x}_r\} + [K]\{x_r\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (26)$$

여기서, x_r 은 지진에 대한 상대응답변위 벡터를 나타낸 것이며, \ddot{x}_g 는 입력지진가속도를 나타낸다. Runge-Kutta 방법을 적용하기 위하여 위의 2차 미분방정식 (26)을 1차 미분방정식의 형태로 변환하는 것이 필요한데, 이를 위해 변위 및 속도벡터를 다음과 같이 치환하고,

$$y_r = \begin{Bmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{Bmatrix} \quad (27)$$

$$\dot{y}_r = \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \ddot{x}_r \end{Bmatrix} \quad (28)$$

가속도 벡터 \ddot{x}_r 를 식 (26)으로 부터 다음과 같이 표현하면,

$$\begin{aligned} \{\ddot{x}_r\} = & -[M]^{-1}[K]\{x_r\} - [M]^{-1}[C]\{\dot{x}_r\} \\ & - [M]^{-1}[M]\{\ddot{x}_g\} \end{aligned} \quad (29)$$

식 (26)의 2차 미분방정식이 $n \times n$ 행렬일 경우 치환된 1차 미분방정식은 $2n \times 2n$ 행렬의 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\{\dot{y}_r\} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y_r\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\{\ddot{x}_g\} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

식 (30)으로 부터 구한 응답은 지진에 대한 상대적인 값이며, 절대응답은

$$x_{abs} = x_r + x_g \quad (31)$$

$$\dot{x}_{abs} = \dot{x}_r + \dot{x}_g \quad (32)$$

$$\ddot{x}_{abs} = \ddot{x}_r + \ddot{x}_g \quad (33)$$

로 부터 구할 수 있다.

Runge-Kutta 방법은 전반적으로 다른 직접적분법에 비하여 비교적 정확한 해를 구할 수 있으나 상태방정식이 높은 고유진동수를 포함할 경우에는 매우 많은 해석시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해서는 불필요한 자유도는 제거하여 전체 상태방정식의 고유진동수를 적절한 수준으로 유지할 필요가 있다. 이를 위하여 강성 및 질량행렬에 대한 응축기법(condensation technique)을 이용할 수가 있다. 먼저 강성행렬에 대한 응축은 고려하고자 하는 강성행렬과 요소의 변위와 힘벡터를 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ac} \\ K_{ca} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_a \\ R_c \end{Bmatrix} \quad (34)$$

여기서 U_a 와 U_c 는 고려하고자 하는 변위벡터와 제거하고자 하는 변위벡터를 각각 나타낸다. 식 (34)에서 제거하고자 하는 변위벡터는

$$U_c = K_{cc}^{-1}(R_c - K_{ca} U_a) \quad (35)$$

이다. 따라서 식 (35)을 식 (34)에 대입하면 다음과 같이 응축된 강성행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$(K_{aa} - K_{ac} K_{cc}^{-1} K_{ca}) U_a = R_a - K_{ac} K_{cc}^{-1} R_c \quad (36)$$

다음으로 질량행렬을 응축하기 위해서는 에너지균형을 이용할 수 있다. 식 (36)에서 제거하고자 하는 자유도 U_c 방향으로는 지진하중이 작용하지 않는다고 가정하고 집중질량모형을 사용할 경우에는 대각선 방향의 질량요소만 존재하므로 다음 식과 같이 간단히 응축된 질량행렬을 구할 수 있다.

$$M_{con} = M_{aa} + K_{ca}^T K_{cc}^{-1} M_{cc} K_{cc}^{-1} K_{ca} \quad (37)$$

유체연계를 갖는 다자유도계 지진해석모델에서 최종적으로 결정된 질량 시스템행렬에서 식 (22)에 주어진 유체부가질량은 유체연계가 작용하는 내부원통과 외부원통의 각 상대 절점에 대응하는 행렬위치에 부과할 수 있다.

3. 진동특성 및 지진해석을 통한 유체부가질량 영향 평가

3.1 해석모델 및 입력지진하중

본 논문에 사용된 해석모델은 Fig. 3과 같이 내부원통과 외부원통 사이에는 유체가 채워져 있고 내부원통과 외부원통의 두께 $t_1=t_2=0.02m$, 길이 $L=10.0m$ 인 두개의 동축원통 구조물이다. 해석을 위하여 내부원통이 유체내부에 잠겨있다고 가정하고 해석모델 끝단에서의 유체슬로싱 효과에 의한 영향은 무시하였다.

내부원통과 외부원통 간의 유체연계 효과를 고려하기 위하여 Fig. 3과 같이 동축원통 구조물에 대한 식 (17), (18), (19)로부터 유체부가질량을 계산하고 이를 각 원통의 절점에 균등 분할하였다. 이때 식 (22)에 주어진 유체연계에 의한 내부원통과 외부원통의 연계거동을 모델링하기 위하여 각 원통에서 상응하는 2개의 절점으로 구성된 유체부가질량을 갖는 연계요소를 정의하고 절점 2와 절점 6을 연계요소 1, 절점 3과 절점 7을 연계요소 2, 그리고 절점 4와 절점 8을 연계요소 3으로 모델링하였다. 이러한 유체부가질량을 갖는 연계요소는 기존의 유한요소해석 방법에서 사용하는 행렬조립기법(global matrix assembly technique)을 사용하여 질량 시스템행렬에 추가할 수 있다.

해석에 사용된 입력지진은 Fig. 4와 같이 US NRC Regulatory Guide 1.60⁽⁷⁾과 SRP 3.7.1⁽⁸⁾의 요건에 부합하는 인공지진 가속도를 사용하였다. Fig. 5는 사용된 입력지진에 대한 3% 임계감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 나타낸 것으로 강지진 주파수대가 2.0Hz에서 10.0Hz사이에 존재한다. 지진시간이력 해석에 사용된 시간간격은 0.01초이며 총 해석시간은 21초이고 3% 구조감쇠를 고려하였다.

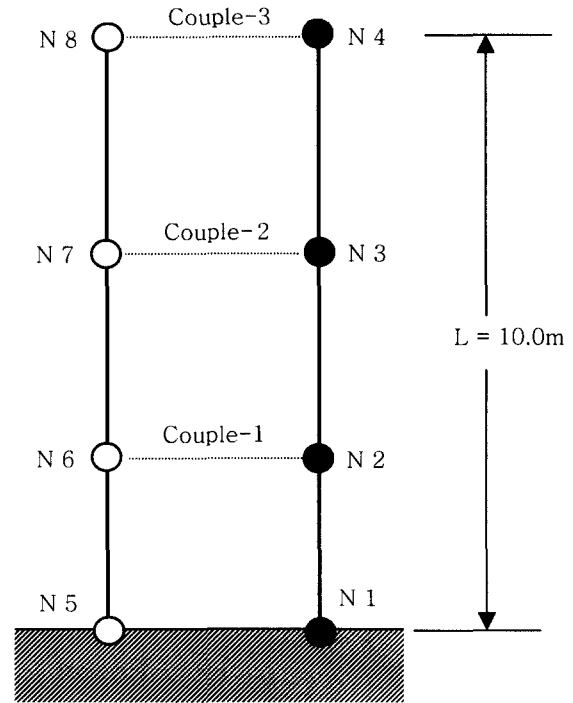
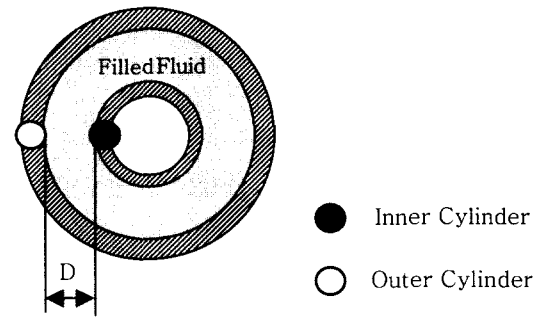


Fig. 3 Seismic analysis model with fluid added mass effects

3.2 외부원통 강성영향

유체 속에 잠긴 내부원통구조물은 유체연계 작용에 의해 외부원통구조물과 연계거동을 하며 이러한 효과는 외부실린더의 강성변화에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 외부원통의 강성변화를 위하여 내부원통과의 재료탄성계수비를 고려하였다.

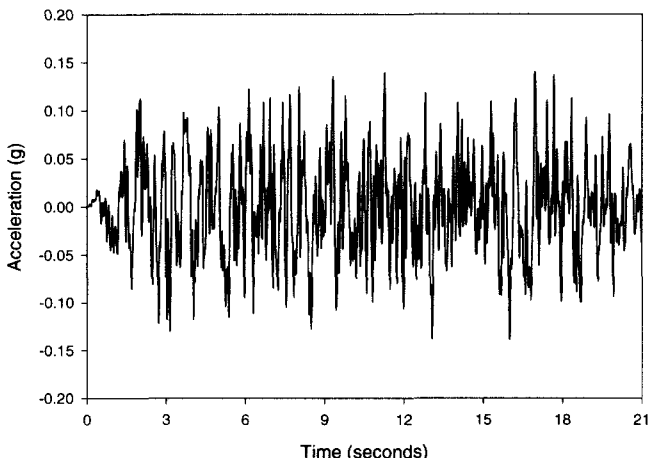


fig. 4 Acceleration time history of input motion

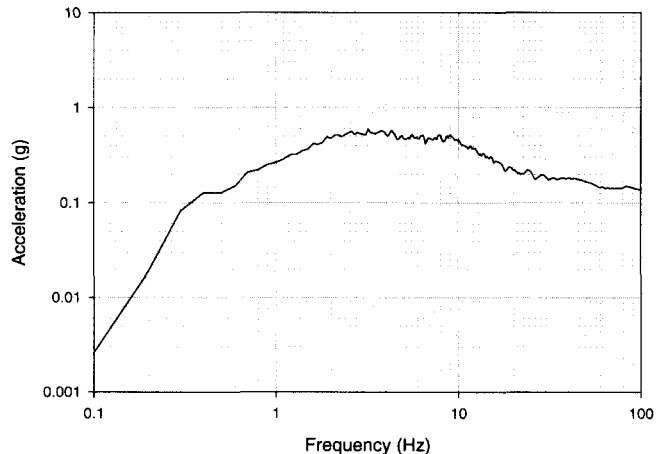


Fig. 5 Acceleration response spectrum of input motion(3% damping)

Fig. 6은 내부원통 반경 $R_1=2.0\text{m}$, 외부원통 반경 $R_2=2.52\text{m}$, 원통사이 환형공간 $D=0.5\text{m}$ 인 경우에 대하여 외부원통의 강성 증가에 따른 내부원통과 외부원통의 1차 진동모우드 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 내부원통과 외부원통은 서로 반대 위상을 갖는 1차 진동모우드 형상을 나타내며 이는 위의 식 (22)의 질량행렬에 나타난 결과와 일치한다. 이러한 연계진동 특성은 외부원통의 강성이 증가함에 따라서 연계고유진동수가 증가하며 외부원통의 진동폭은 내부원통의 진동폭에 비하여 상대적으로 크게 작아지면서 두 원통간의 연계거동이 크게 줄어드는 결과를 나타낸다.

Fig. 7은 내부원통 반경 $R_1=2.0\text{m}$, 원통사이 환형공간 $D=0.5\text{m}$, 내부원통 두께 $t_1=0.02\text{m}$ 인 경우에 외부원통의 두께가 변하는 경우에 대한 내부원통의 1차 고유진동수 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 외부원통 두께가 커질수록 내부원

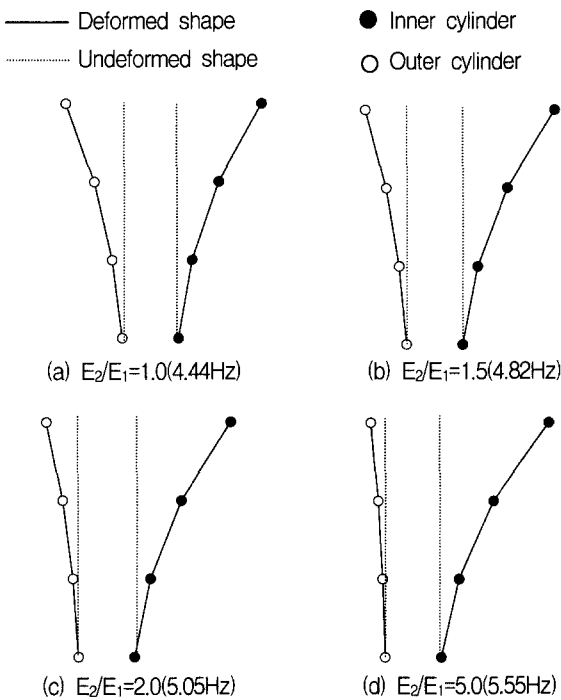


Fig. 6 Coupled mode shapes of concentric cylinders($D=0.5\text{m}$, $R_1=2.0\text{m}$, $t_1=t_2=0.02\text{m}$)

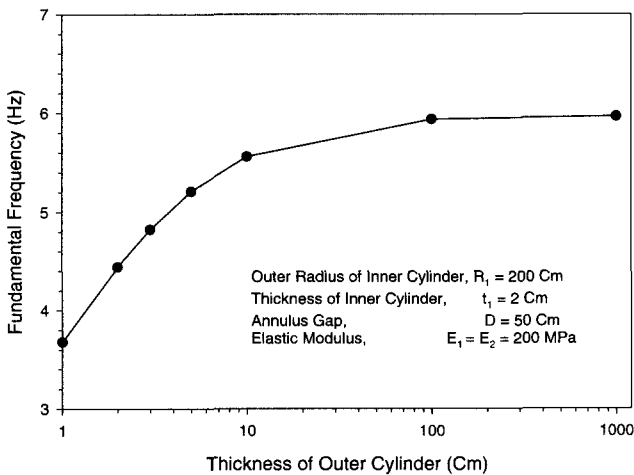


Fig. 7 Effects of thickness of outer cylinder of fundamental frequency of inner cylinder

통의 고유진동수는 높아지며 두께가 어느 이상으로 증가하면 유체연계로 인한 두 원통간의 연계진동이 사라지고 내부원통의 고유진동수는 일정하게 된다. 이러한 현상은 Fig. 6의 재료탄성계수 변화를 고려한 해석결과와 같은 경향을 나타낸다.

Fig. 8은 외부원통의 재료탄성계수 증가에 따른 시간이력 지진응답해석을 수행하고 내부원통 상부끝단(절점 4)에서의 응답스펙트럼 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 내부원통과 외부원통의 탄성계수가 비슷할 경우에 반대 위상을 갖는 연계거동의 1차 진동모우드에 대한 내부구조물의 지진응답은 동위상을 나타내는 2차 진동모우드에서의 지진응답보다 상대적으로 작게 나타난다. 그러나 외부원통의 강성이 증가함에 따라서 반대 위상을 갖는 1차 진동모우드에서의 지진응답이 뚜렷이 증가하는 것을 알 수 있고 동위상을 갖는 2차 진동모우드에서의 지진응답은 점차 줄어들며 외부원통의 강성이 강체에 접근할수록 1차 진동모우드에서의 지진응답이 지배적으로 나타나며 2차 진동모우드에서의 거동은 현저히 줄어든다. 이러한 현상은 Fig. 6의 진동모우드 형상 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이 외부원통의 탄성계수가 내부원통에 비하여 증가함에 따라서 연계거동이 약해지며 내부원통의 1차 진동모우드가 점차 지배적으로 나타나기 때문이다.

동축원통의 환형공간에 채워진 유체와 구조물 간의 연계거동을 고려한 시간이력 지진응답해석에서 외부원통의 강성 증가에 대한 내부원통의 지진응답특성은 Fig. 8에서와 같이 외부원통의 강성이 크게 증가하더라도 내부원통에서의 영주기 가속도(zero period acceleration) 응답은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

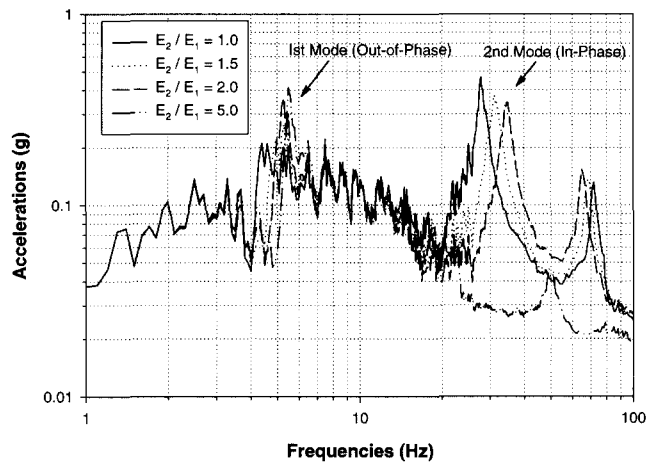


Fig. 8 Response spectra at top of inner cylinder($D=0.5\text{m}$, $R_1=2.0\text{m}$, $t_1=0.02\text{m}$)

3.3 동축원통이 갖는 환형공간 영향

동축을 갖는 내부원통과 외부원통 간의 유체가 채워진 환형공간이 커질수록 즉, 외부원통 직경이 내부원통 직경에 비해 커질수록 동축원통의 연계고유진동수는 증가한다. Fig. 9는 두 원통 구조물의 탄성계수비와 환형간격의 변화에 따른

내부원통의 1차 고유진동수의 변화를 나타낸 것으로 환형간격이 커질수록 고유진동수는 높아지며 환형간격이 $D=25\text{m}$ 이상이면 내부원통의 1차 진동모우드는 외부원통과의 비연계거동을 나타낸다. 즉 환형공간이 충분히 커지면 내부원통의 진동특성은 무한 유체속에서의 진동특성과 같게 된다. 이러한 내부원통의 진동특성은 앞서 설명한 바와 같이 외부원통과 내부원통의 강성비에 따라서 영향을 받는다. 예를 들어 Fig. 9에서와 같이 외부원통의 재료탄성계수가 내부원통에 비해 2배 이상 큰 경우에는 환형간격 $D=10\text{m}$ 정도에서도 동축 원통은 비연계 거동을 나타내며 탄성계수비가 증가함에 따라서 내부원통의 진동특성은 무한 유체속에서의 진동특성에 접근한다.

Fig. 10은 내부원통 반경 $R_1=2.0\text{m}$, 내부 및 외부원통 두께 $t_1=t_2=0.02\text{m}$ 그리고 두 원통간의 재료탄성계수비 $E_2/E_1=10.0$ 인 경우에 두 원통간의 환형간격에 따른 시간이력 지진응답 해석을 수행하고 내부원통에 대한 지진가속도 응답스펙트럼을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 환형간격이 넓어질수록 1차 고유진동수가 증가하며 영주기 가속도 응답이 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 유체연계로 인한 동축 원통간의 연계거동이 커질수록 지진응답이 줄어들며 무한 유체속에 놓일수록 지진응답이 증가함을 나타낸다.

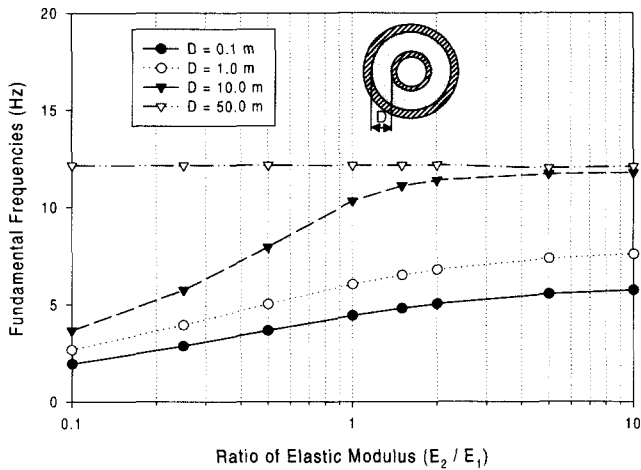


Fig. 9 Annulus gap distance effects on fundamental frequency of inner cylinder

3.4 유체연계의 고려여부

본 연구에서는 유체연계로 인한 동축원통 간의 연계거동을 무시하고 각 원통에 독립적인 단순 유체부가질량만을 고려하여 고유진동수해석과 시간이력 지진응답해석을 수행할 경우 발생할 수 있는 해석결과들의 차이점을 살펴보았다.

Fig. 11은 내부원통구조물에 대한 1차 고유진동수를 나타낸 것으로 식 (22)의 질량행렬에서 비대각선 행렬의 연계항(coupling terms)을 고려하지 않았을 경우에 1차 고유진동수는 두 원통간의 재료탄성계수비와 상관없이 5.97Hz이며 이는 그림에서와 같이 외부원통의 강성이 증가함에 따라서 연계거동이 없어진 비연계 고유진동수 값과 일치한다. 연계항을 고려할 경우에 내부원통의 고유진동수는 연계항을 고려하지 않은 경우의 고유진동수보다 낮게 나타나며 외부원통의 강성이 증가함에 따라서 비연계 고유진동수 해석결과에 접근한다. 유체속에 잠긴 동축원통의 지진해석모델 작성시에 유체부가질량의 연계항과 식 (19)의 α 값을 무시했을 경우에 Fig. 11에서와 같이 내부원통의 고유진동수는 크게 증가한다. Fig. 12는 외부원통에 대한 고유진동수 변화를 나타낸 것으로 내부원통과 마찬가지로 유체부가질량행렬에서

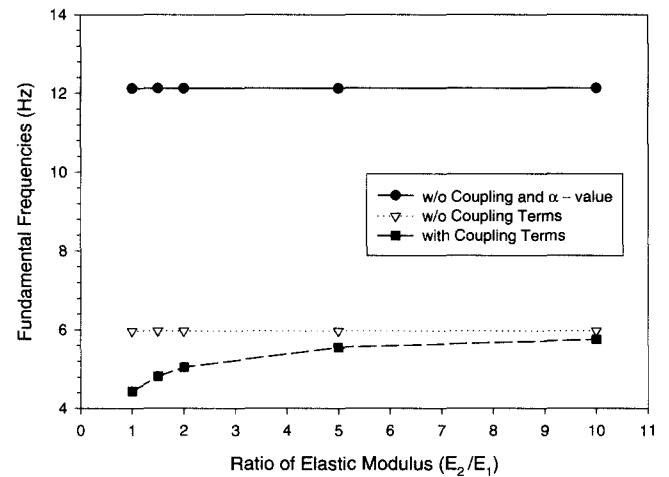


Fig. 11 Effects of coupling terms on fundamental frequency of inner cylinder

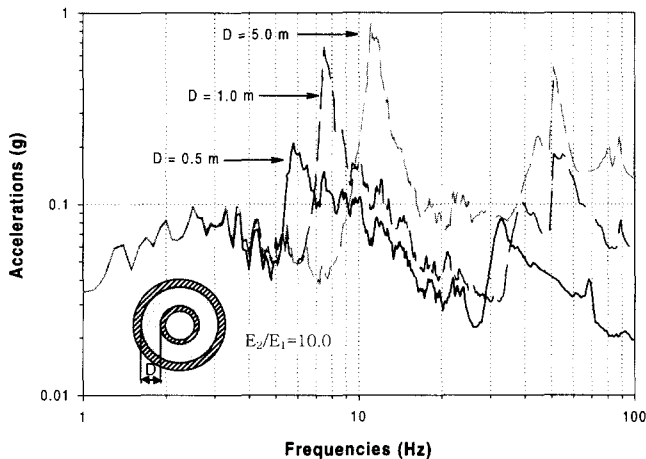


Fig. 10 Effects of annulus gap on response spectrum at top of inner cylinder($R_1=2.0\text{m}$, $t_1=t_2=0.02\text{m}$)

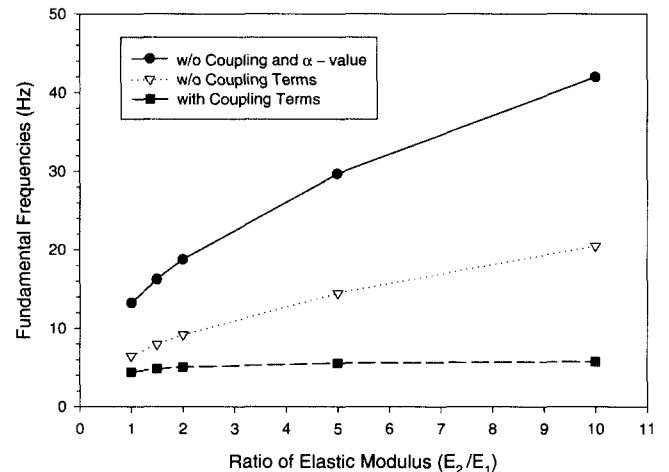


Fig. 12 Effects of coupling terms on fundamental frequency of outer cylinder

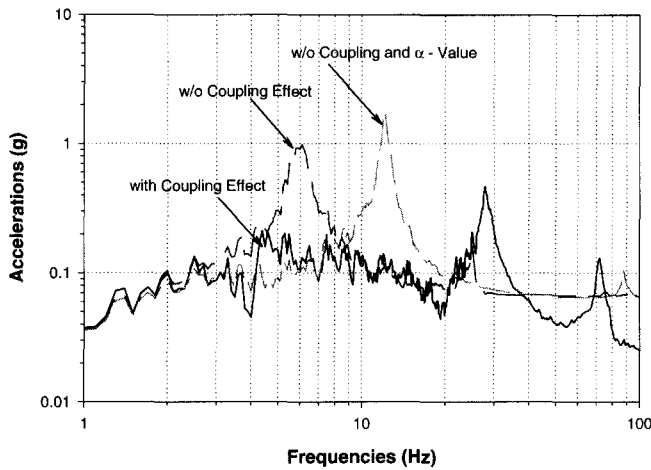


Fig. 13 Acceleration response spectra at top of inner cylinder($R_1=2.0m$, $t_1=t_2=0.02m$)

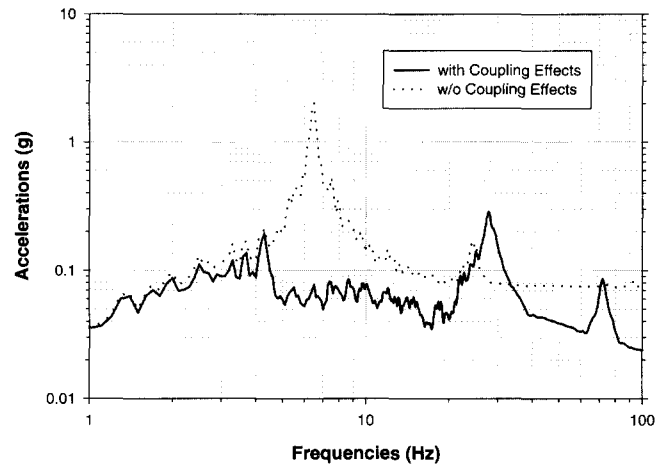


Fig. 14 Acceleration response spectra at top of outer cylinder($R_1=2.0m$, $t_1=t_2=0.02m$)

연계항을 고려할 경우 고유진동수가 줄어들며 이러한 결과를 통해 유체연계에 의한 동축원통 간의 연계거동이 구조물의 고유진동수에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 내부원통 반경 $R_1=2.0m$, 환형간격 $D=0.5m$, 내부 및 외부원통 두께 $t_1=t_2=0.02m$ 그리고 두 원통간의 재료탄성계수비 $E_2/E_1=1.0$ 인 경우에 대하여 시간이력지진응답 해석을 수행하고 내부원통 상단(절점 4)에서의 지진가속도 응답스펙트럼 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 연계항을 고려할 경우 영주기 가속도응답이 크게 줄어들 수 있다. 이는 지진응답해석시 연계항의 영향으로 인해 발생하는 식 (25)에 주어진 지진하중 감소작용 때문이다. Fig. 14는 외부원통 상단(절점 8)에서의 지진가속도 응답스펙트럼을 나타낸 것으로 내부원통의 결과와 마찬가지로 연계항을 고려할 경우 영주기 가속도응답이 크게 줄어드는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동특성과 지진응답에 대한 유체부가질량의 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 유체연계 거동에 대한 이론적 배경을 검토하고 기존의 유체부가질량법을 고려하여 시간이력 지진응답해석을 수행할 수 있는 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘을 개발하였다. 적용예로서 두개의 동축원통에 대한 단순지진해석모델을 가정하고 유체부가질량을 고려한 진동특성해석과 지진응답해석을 수행하였으며 해석결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 유체가 채워진 두개의 동축원통 구조물은 유체연계로 인하여 서로 반대 위상을 갖는 1차 고유진동모우드를 나타낸다.
- 외부원통의 강성이 증가할수록 두 원통 구조물 간의 연계거동은 줄어들며 내부원통의 1차 고유진동수는 증가한다.
- 반대 위상의 1차 고유진동모우드에 대한 지진응답보다 동

위상을 갖는 진동모우드에 대한 지진응답이 더 크게 나타나며 외부원통의 강성이 증가할수록 연계거동이 줄어들면서 반대 위상의 진동모우드에서의 지진응답이 커진다.

- 유체가 채워진 두개의 동축원통간 환형간격이 넓을수록 내부원통의 1차 고유진동수가 높아지면서 무한 유체속에서의 진동특성에 접근하고 지진응답해석시 영주기 가속도응답이 크게 증가한다.
- 유체부가질량 행렬에서 비대각선 부분에 나타나는 연계항은 동축원통 구조물의 연계거동에 영향을 끼치며 지진응답해석시 이를 고려하지 않았을 경우 영주기 가속도응답이 크게 증가한 결과를 나타낼 수 있다.

유체가 채워진 동축원통 구조물은 유체연계로 인하여 구조물의 진동특성과 지진응답특성이 크게 영향을 받을 수 있으므로 해석시 연계항을 포함한 유체부가질량의 영향을 신중하게 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 한도희, 김영진, 구경희 외 다수, "KALIMER 예비 개념설계 보고서", KAERI/TR-1636/2000, 한국원자력연구소, 2000.
2. "Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary on standard for seismic analysis of safety related nuclear structures," American Society of Civil Engineers, 1986.
3. Fritz, R. J., "The effects of liquids on the dynamic motions of immersed solids," Journal of Engineering for Industry, ASME, 1972, pp. 167-173.
4. Chen, S. S., Wambsganss, M. W., and Sendozejczyk, J.

- A., "Added mass and damping of a vibrating rod in confined viscous fluids," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 98, No. 2, 1976, pp. 325-329.
5. Sharp, G. R. and Wenzel, W. A., "Hydrodynamic mass matrix for a multibodied system," *Journal of Engineering for Industry*, 1974, pp. 611-618.
6. 구경희, 이형연, 유 봉, "면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석", 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제1호, 1999, pp. 75-92.
7. *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, United State Nuclear Regulatory Commission, US NRC Reg. Guide 1.60, 1973.
8. *Seismic Design Parameters*, United State Nuclear Regulatory Commission, US NRC Standard Review Plan 3.7.1, 1981.