2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

지진응답 해석시 유체-구조물 상호작용 영향

Effect of Fluid-Structure Interactions on Seismic Response Analysis

구경희, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고온에서 운전되는 액체금속로 원자로구조물은 열응력을 최소화하기 위하여 원자로용기를 비롯한 내부구조물의 두께가 기존 경수로에 비하여 매우 얇은 박막 구조물이다. 따라서 이에 대한 내진설계 및 지진해석을 위하여 원자로내부에 존재하는 소듐냉각재의 유체-구조물 상호작용을 고려한 단순지진해석 모델링 개발이 필수적이다. 이를 위하여 본 논문에서는 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 유체-구조물 상호작용을 고려한 범용 지진응답해석코드 SAC-THA 를 개발하고 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동특성과 지진응답특성을 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.

ABSTRACT

The thickness of LMR(Liquid Metal Reactor) structures operating at high temperature are very thin compared with conventional PWR to reduce the thermal stress. Therfore, it is necessary to develop the simple seismic analysis model including the fluid-structure interaction effects. In this paper, the seismic analysis code, SAC-THA including the fluid-structure interaction modeling for the immersed concentric cylinders are developed and the vibration and seismic response characteristics are investigated for the simple immersed concentric cylinder. From the coupled modal analysis and the seismic analysis, 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.

1. 서 론

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

원자로구조물에 있어서 원자로용기와 주요 내부구조물들은 대부분 동축원통 구조물 형상이며 일차냉각재와 접하고 있다. 그러나 실제로 원자로구조물은 Fig. 1 과 같이 내부 형상이 매우 복잡하며 이들 구조물과 냉각재 간의 유체-구조물 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 원자로내부의 냉각재는 유체부가질량으로 모델링하는 방법들을 사용하고 있다(2). 유체속에 잠긴 여러가지 구조물에 있어서 유체부가질량 행렬을 유도하는 연구는 R.J. Fritz 를 포함한 많은 연구자들에 의해 연구된 바 있으며(3,4,5) 이들의 연구결과들은 미국 ASCE(American Society of Civil Engineers)에서 제안한 안전성관련 원자력구조물의 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 원자로내부 소듐냉각재를 동축원통간의 상호작용을 고려하지 않은 단순 유체부가질량으로만 고려한 지진해석모델이 사용된 바가 있다(6). 실제로 액체금속로 원자로내부에 있는 일차 소듐냉각재에 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 유체부가질량을 고려한 범용 시간이력 지진해석코드 SAC-THA를 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 살펴보았다.

2. 유체연계를 갖는 동축원통 구조물의 지진해석 공식화

Fig. 2에서와 같이 두개의 동축원통 사이에 환형유체가 채워진 구조물의 내부원통 외반경을 R_1, 외부원통의 내반경을 R_2 그리고 원통길이를 L이라고 하고 원통길이 L은 외부원통의 내반경 R_2에 비하고 매우 크다고 가정한다. 두개의 동축원통 사이에 채워진 환형유체의 마찰을 무시하고 동축원통이 정지해 있을 때 유체도 정지해 있다고 가정하면 유체를 비회전성이라고 볼 수 있고 이러한 가정에 근거하여 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 유체-구조물 상호작용을 고려한 유체부가질량을 유도할 수 있다(3, 7)

Fig. 2와 같이 직경이 다른 두개의 동축원통 사이에 유체가 채워져 있을 경우 주어진 시스템에 대한 지진운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{1}$$

여기서 m_1과 m_2는 각 원통 구조물의 질량, k_1과 k_2는 강성을 나타내며 x_1과 x_2는 일반화된 좌표를 각각 나타낸다. 식 (1)에서 세번째 항은 각 원통에 작용하는 유체의 지진반력을 나타내는 것으로서 다음과 같이 표현할 수 있다(7).

$$\begin{Bmatrix} F_{f1} \\ F_{f2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha M_1 & -(1+\alpha) M_1 \\ -(1+\alpha) M_1 & (1+\alpha) M_1 + M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_2 + \ddot{x}_g \end{Bmatrix} \tag{2}$$

위의 식에서 $\alpha=(R_2^2 + R_1^2)/(R_2^2 - R_1^2)$ 이며 $\ddot{x}_g$는 입력지진동 가속도를 나타낸다. 따라서 식 (1)과 식 (2)을 정리하면 다음과 같은 유체연계를 고려한 지진운동방정식을 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m_1 + \alpha M_1 & -(1+\alpha) M_1 \\ -(1+\alpha) M_1 & m_2 + (1+\alpha) M_1 + M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = -\ddot{x}_g \begin{Bmatrix} m_1 - M_1 \\ m_2 + M_2 \end{Bmatrix} \tag{3}$$

위의 식 (3)의 왼쪽 유체부가질량 행렬에서 대각선행렬 외에 발생되는 유체부가질량 항은 유체연계에 의하여 외부원통과 내부원통 간의 연계거동이 존재함을 나타낸다. 이러한 연계거동은 식 (3)에서 알 수 있듯이 각 원통구조물의 $\ddot{x}_1$와 $\ddot{x}_2$에 대한 질량 항들이 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 강체(x_2=0)로 가정할 수 있으며 이때 유체에 잠겨있는 내부원통의 지진운동방정식은 위의 식(3)으로부터 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$(m_1 + \alpha M_1)\ddot{x}_1 + k_1 x_1 = -(m_1 - M_1)\ddot{x}_g \tag{4}$$

위의 식 (4)에서 외부원통과 내부원통의 간격($R_2 - R_1$)이 줄어들 수록 α는 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.

$$D_f \equiv \frac{f_{fluid}}{f_{air}} = \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + \alpha M_1}} \tag{5}$$

또한 유체속에 잠겨있는 물체는 유체부가질량 효과로 인하여 가진 지진하중이 감소하는 결과를 나타낸다. 식 (4)의 오른쪽 항에 나타난 바와 같이 구조물을 가진하는 지진하중이 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.

$$D_e = \frac{m_1 - M_1}{m_1 + \alpha M_1} \tag{6}$$

3. 진동특성 및 지진해석을 통한 유체부가질량 영향 평가

3.1 해석모델 및 입력지진하중

본 논문에 사용된 해석모델은 Fig. 2와 같이 내부원통과 외부원통 사이에는 유체가 채워져 있고 내부원통과 외부원통의 두께 $t_1=t_2=0.02$m, 길이 L=10.0m인 두개의 동축원통 구조물이다. 해석을 위하여 내부원통이 유체내부에 잠겨있다고 가정하고 해석모델 끝단에서의 유체슬로싱 효과에 의한 영향은 무시하였다.

해석에 사용된 입력지진은 US NRC Regulatory Guide 1.60[7]과 SRP 3.7.1(8)의 요건에 부합하는 인공지진가속도를 사용하였다.

3.2 외부원통 강성영향

유체 속에 잠긴 내부원통구조물은 유체연계 작용에 의해 외부원통구조물과 연계거동을 하며 이러한 효과는 외부실린더의 강성변화에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 나타

났다. 본 논문에서는 외부원통의 강성변화를 위하여 내부원통과의 재료탄성계수 비를 고려하였다.

Fig. 3 은 내부원통 반경 R_1=2.0m, 외부원통 반경 R_2=2.52m, 원통사이 환형공간 D=0.5m 인 경우에 대하여 외부원통의 강성 증가에 따른 내부원통과 외부원통의 1 차 진동모우드 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 내부원통과 외부원통은 서로 반대 위상을 갖는 1 차 진동모우드 형상을 나타내며 이는 위의 식 (3)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. 4 는 내부원통 반경 R_1=2.0m, 원통사이 환형공간 D=0.5m, 내부원통 두께 t_1=0.02m 인 경우에 외부원통의 두께가 변하는 경우에 대한 내부원통의 1 차 고유진동수 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 외부원통 두께가 커질수록 내부원통의 고유진동수는 높아지며 두께가 어느 이상으로 증가하면 유체연계로 인한 두 원통간의 연계진동이 사라지고 내부원통의 고유진동수는 일정하게 된다. 이러한 현상은 Fig. 3 의 재료탄성계수 변화를 고려한 해석결과와 같은 경향을 나타낸다.

Fig. 5 는 외부원통의 재료탄성계수 증가에 따른 시간이력지진응답해석을 수행하고 내부원통 상부끝단(절점 4)에서의 응답스펙트럼 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 내부원통과 외부원통의 탄성계수가 비슷할 경우에 반대 위상을 갖는 연계거동의 1 차 진동모우드에 대한 내부구조물의 지진응답은 동위상을 나타내는 2 차 진동모우드에서의 지진응답보다 상대적으로 작게 나타난다. 그러나 외부원통의 강성이 증가함에 따라서 반대 위상을 갖는 1 차 진동모우드에서의 지진응답이 뚜렷이 증가하는 것을 알 수 있고 동위상을 갖는 2 차 진동모우드에서의 지진응답은 점차 줄어들며 외부원통의 강성이 강체에 접근할수록 1 차 진동모우드에서의 지진응답이 지배적으로 나타나며 2 차 진동모우드에서의 거동은 현저히 줄어든다. 이러한 현상은 Fig. 3 의 진동모우드 형상 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이 외부원통의 탄성계수가 내부원통에 비하여 증가함에 따라서 연계거동이 약해지며 내부원통의 1 차 진동모우드가 점차 지배적으로 나타나기 때문이다.

동축원통의 환형공간에 채워진 유체와 구조물 간의 연계거동을 고려한 시간이력 지진응답해석에서 외부원통의 강성증가에 대한 내부원통의 지진응답특성은 Fig. 5 에서와 같이 외부원통의 강성이 크게 증가하더라도 내부원통에서의 영주기 가속도(Zero period acceleration) 응답은 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

3.3 동축원통이 갖는 환형공간 영향

동축을 갖는 내부원통과 외부원통 간의 유체가 채워진 환형공간이 커질수록 즉, 외

부원통 직경이 내부원통 직경에 비해 커질수록 동축원통의 연계고유진동수는 증가한다. Fig. 6은 두 원통 구조물의 탄성계수 비와 환형간격의 변화에 따른 내부원통의 1차 고유진동수의 변화를 나타낸 것으로 환형간격이 커질수록 고유진동수는 높아지며 환형간격이 R=25m 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. 6에서와 같이 외부원통의 재료탄성계수가 내부원통에 비해 2배 이상 큰 경우에는 환형간격 D=10m 정도에서도 동축 원통은 비연계거동을 나타내며 탄성계수비가 증가함에 따라서 내부원통의 진동특성은 무한 유체속에서의 진동특성에 접근한다.

Fig. 7은 내부원통 반경 R_1=2.0m, 내부 및 외부원통 두께 t_1=t_2=0.02m 그리고 두 원통간의 재료탄성계수비 E_2/E_1=10.0인 경우에 두 원통간의 환형간격에 따른 시간이력 지진응답해석을 수행하고 내부원통에 대한 지진가속도 응답스펙트럼을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 환형간격이 넓어질수록 1차 고유진동수가 증가하며 영주기 가속도응답이 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 유체연계로 인한 동축 원통간의 연계거동이 커질수록 지진응답이 줄어들며 무한 유체속에 놓일수록 지진응답이 증가함을 나타낸다.

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. 8은 내부원통구조물에 대한 1차 고유진동수를 나타낸 것으로 식 (3)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. 연계성항을 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 (2)의 α값을 무시했을 경우에 Fig. 8에서와 같이 내부원통의 고유진동수는 크게 증가한다. Fig. 9는 외부원통에 대한 고유진동수 변화를 나타낸 것으로 내부원통과 마찬가지로 유체부가질량행렬에서 연계항을 고려할 경우 고유진동수가 줄어들며 이러한 결과를 통해 유체연계에 의한 동축원통 간의 연계거동이 구조물의 고유진동수에 크게 영향을 주

는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 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=1.0인 경우에 대하여 시간이력지진 응답해석을 수행하고 내부원통 상단(절점 4)에서의 지진가속도 응답스펙트럼 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 연계항을 고려할 경우 영주기 가속도응답이 크게 줄어듦을 알 수 있다. 이는 지진응답 해석시 연계항의 영향으로 인해 발생되는 식 (6)에 주어진 지진하중 감소작용 때문이다. Fig. 11은 외부원통 상단(절점 8)에서의 지진가속도 응답스펙트럼을 나타낸 것으로 내부원통의 결과와 마찬가지로 연계항을 고려할 경우 영주기 가속도응답이 크게 줄어드는 것으로 나타났다.

4.0 결 론

본 논문에서는 유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동특성과 지진응답에 대한 유체-구조물 상호작용의 영향을 살펴보았다. 해석결과 유체가 채워진 두개의 동축원통 구조물은 유체연계로 인하여 서로 반대 위상을 갖는 1차 고유진동모우드를 나타내며 이러한 진동특성은 유체-구조물 상호작용의 영향으로 인하여 구조물의 진동특성과 지진응답특성이 크게 영향을 받을 수 있으므로 해석시 연계항을 포함한 유체부가질량의 영향을 신중하게 고려해야 하는 것으로 나타났다. 향후 Fritz의 가정이 적용되지 않는 L/R의 비가 작은 동축원통의 경우에 대한 유체부가질량 결정방법과 지진해석모델링 연구가 계속 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한도희, 김영진, 구경회, 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. R.J. Fritz, “The Effects of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids,” *Journal of Engineering for Industry*, ASME, pp. 167-173, 1972.
4. S.S. Chen, M.W. Wambsganss, and J.A. Sendozejczyk, “Added Mass and Damping of a Vibrating Rod in Confined Viscous Fluids,” *Journal of Applied Mechanics*, 98(2), pp. 325-329, 1976.

5. G.R.Sharp and W.A. Wenzel, “Hydrodynamic Mass Matrix for a Multibodied System,” *Journal of Engineering for Industry*, pp.611-618, 1974.
6. 구경회, 이형연, 유봉, “면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석,” *한국지진공학회 논문집*, 제 3 권 제 1 호, pp.75-92, 1999.
7. 구경회, 이재한, “유체속에 잠긴 동축원통 구조물의 진동특성 및 지진응답에 대한 유체부가질량영향,” *한국지진공학회 논문집*, 인쇄중, 2001.
8. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, *United State Nuclear Regulatory Commission*, US NRC Reg. Guide 1.60, 1973.
9. Seismic Design Parameters, *United State Nuclear Regulatory Commission*, US NRC Standard Review Plan 3.7.1, 1981.

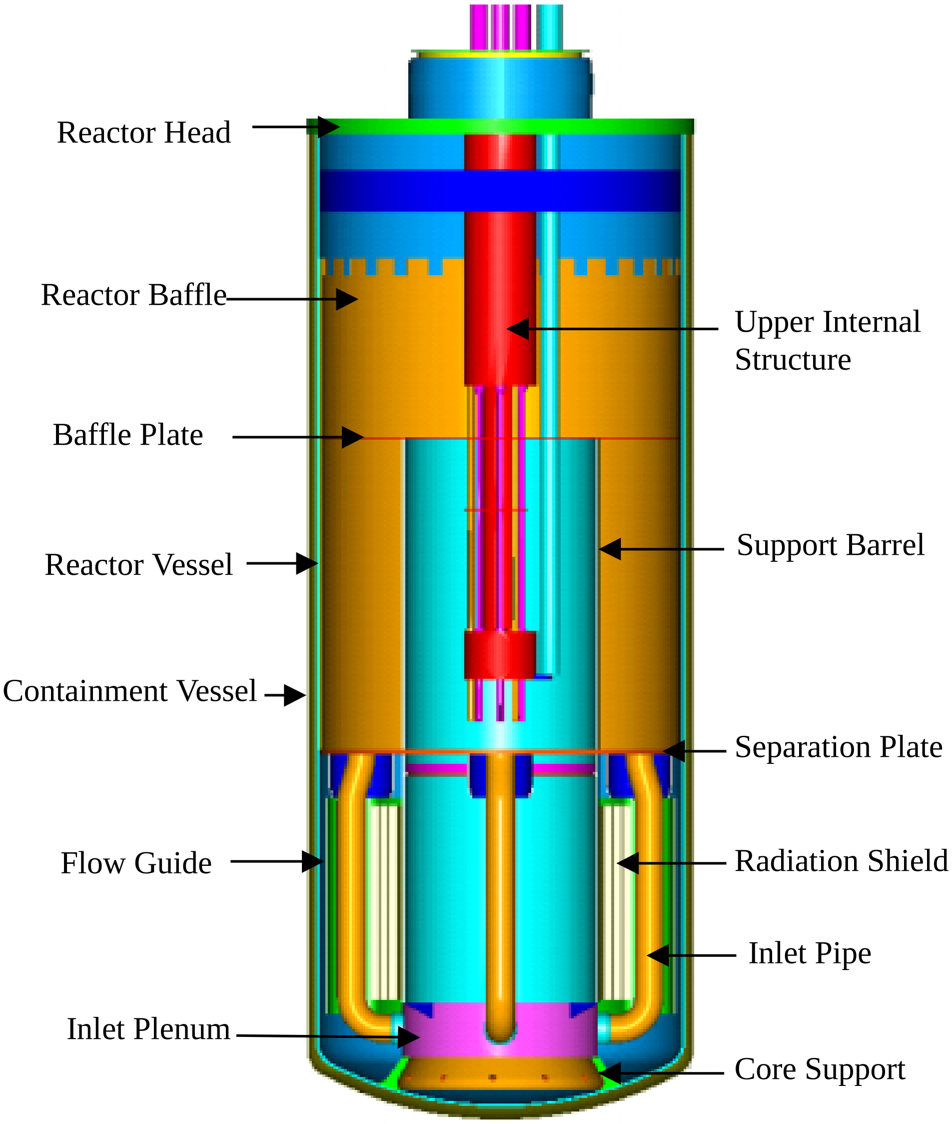


Fig. 1 Reactor Structures of LMR (KALIMER 150MWe)

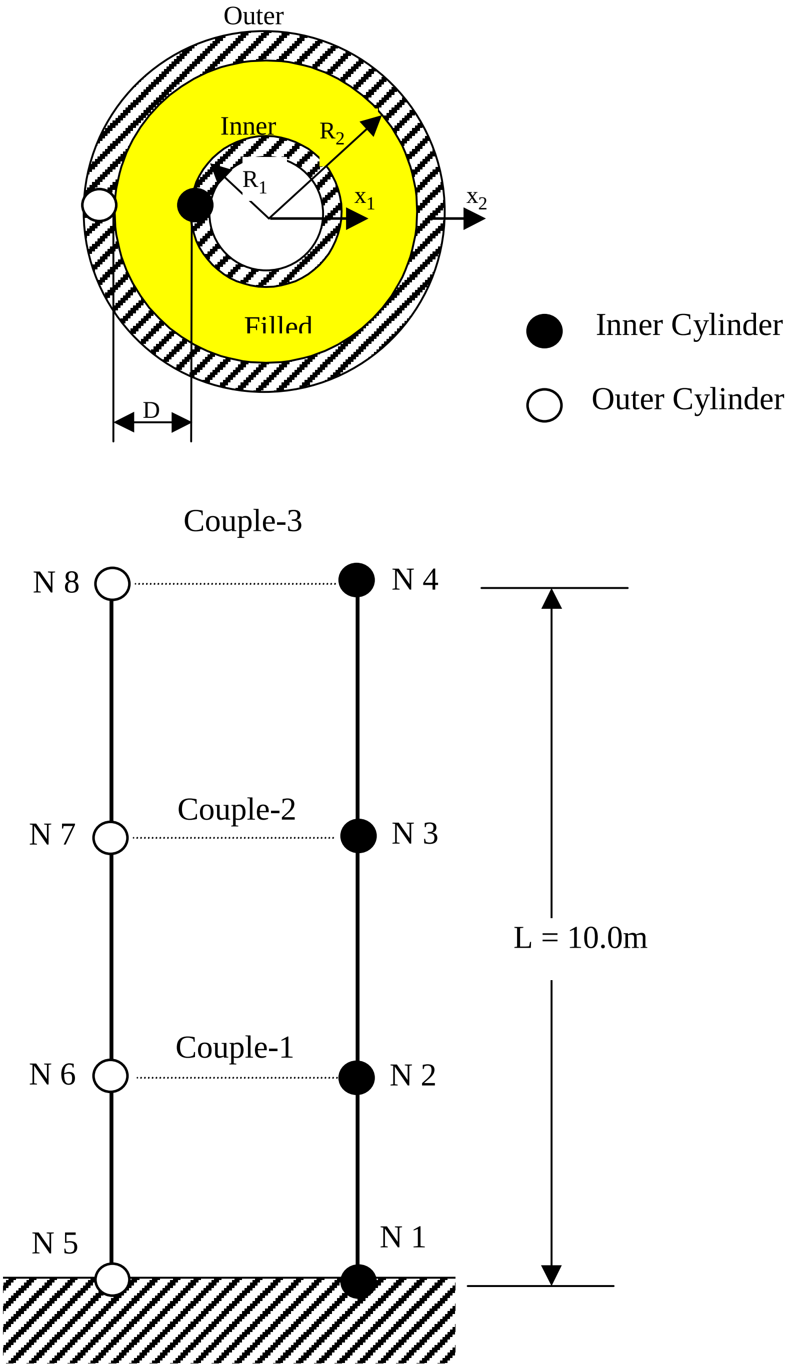
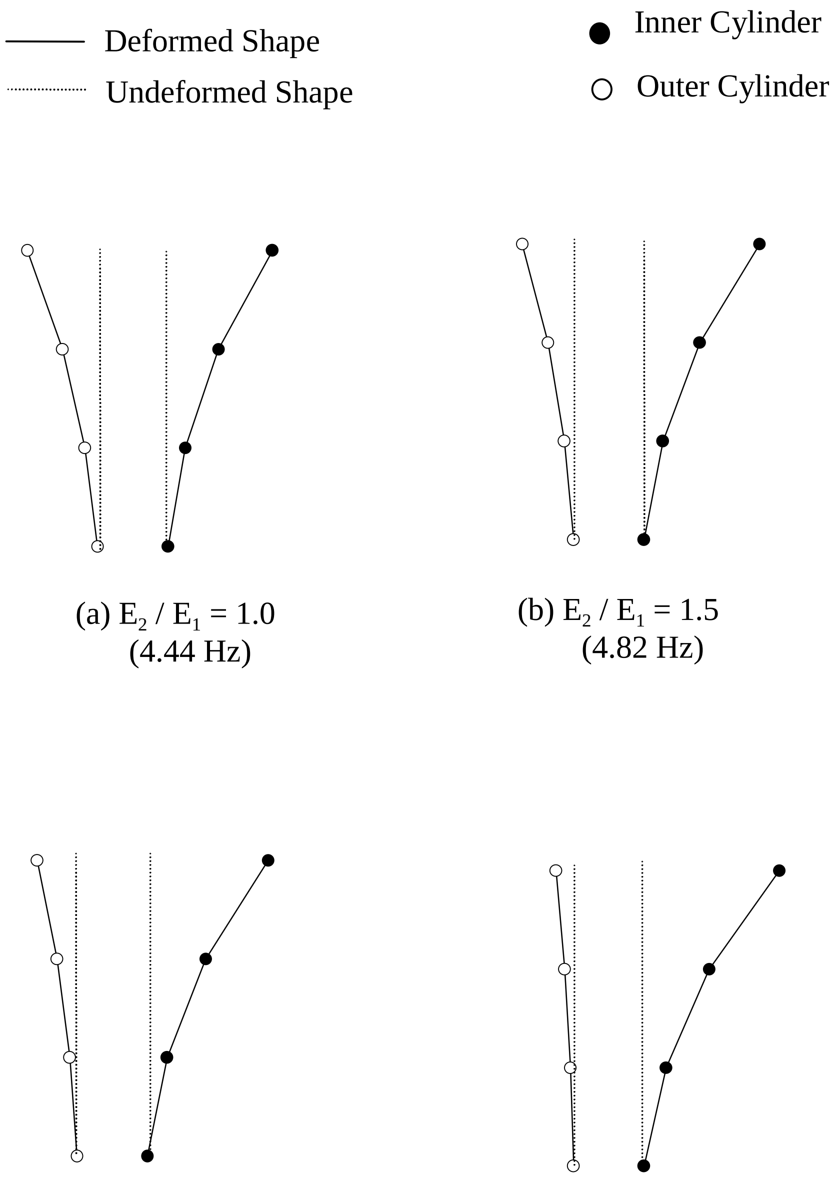


Fig. 2 Seismic Analysis Model With Fluid Added Mass Effects



(a) E_2 / E_1 = 1.0
(4.44 Hz)

(b) E_2 / E_1 = 1.5
(4.82 Hz)

(c) E_2 / E_1 = 2.0
(5.05 Hz)

(d) E_2 / E_1 = 5.0
(5.55 Hz)

Fig. 3 Coupled Mode Shapes of Concentric Cylinders (D=0.5m, D_1=4.0m, t_1=t_2=0.02m)

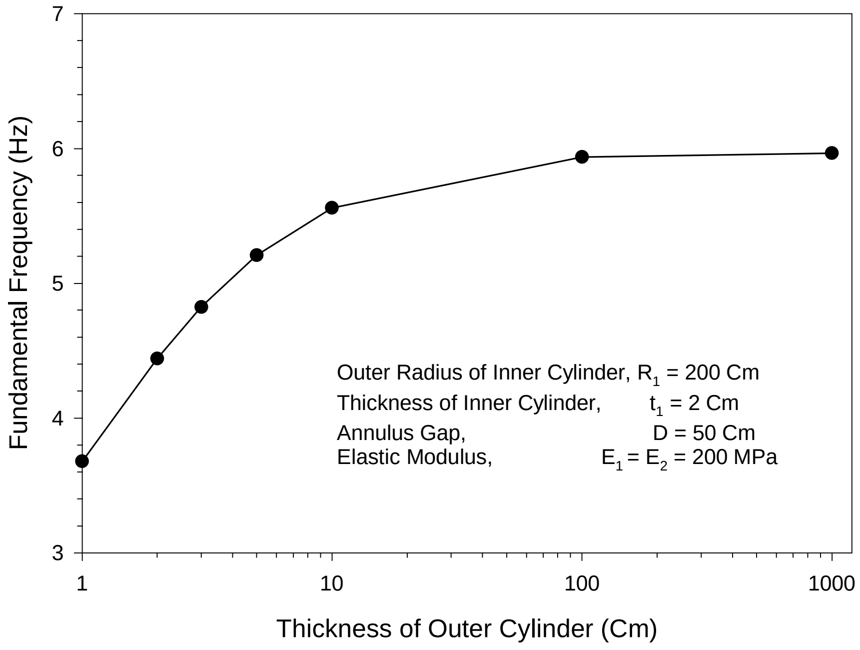


Fig. 4 Effects of Thickness of Outer Cylinder on Fundamental Frequency of Inner Cylinder

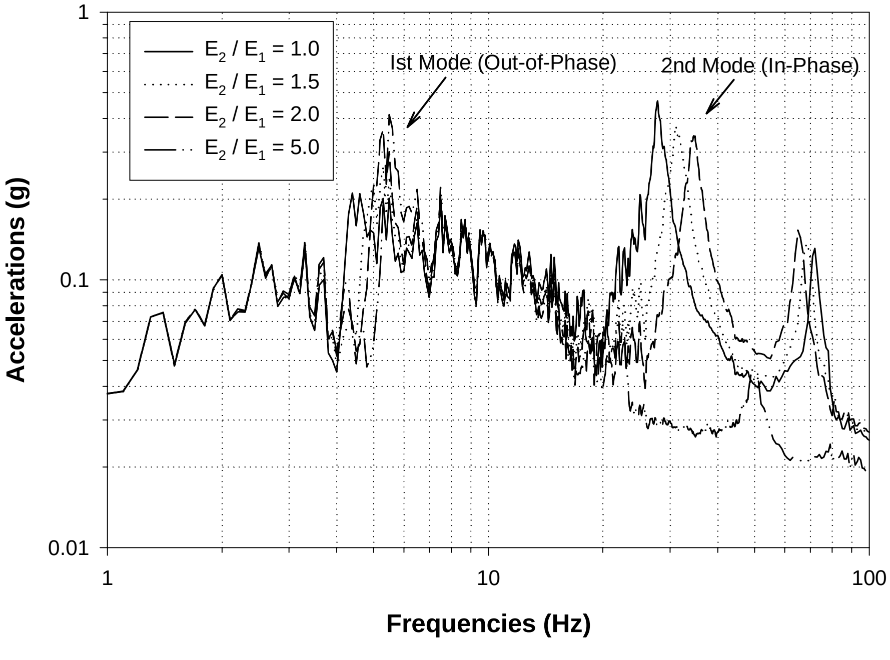


Fig. 5 Response Spectra at Top of Inner Cylinder (D=0.5m, R_1=2.0m, t_1=t_2=0.02m)

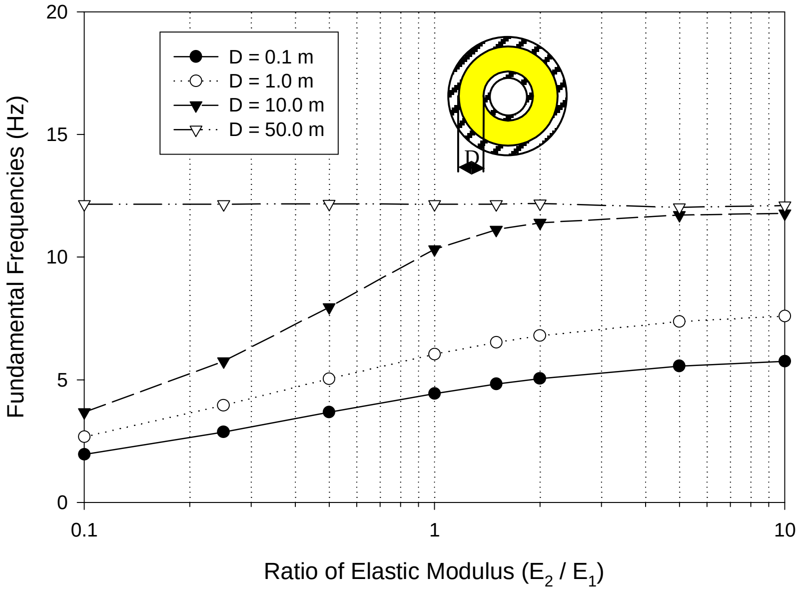


Fig. 6 Annulus Gap Distance Effects on Fundamental Frequency of Inner Cylinder

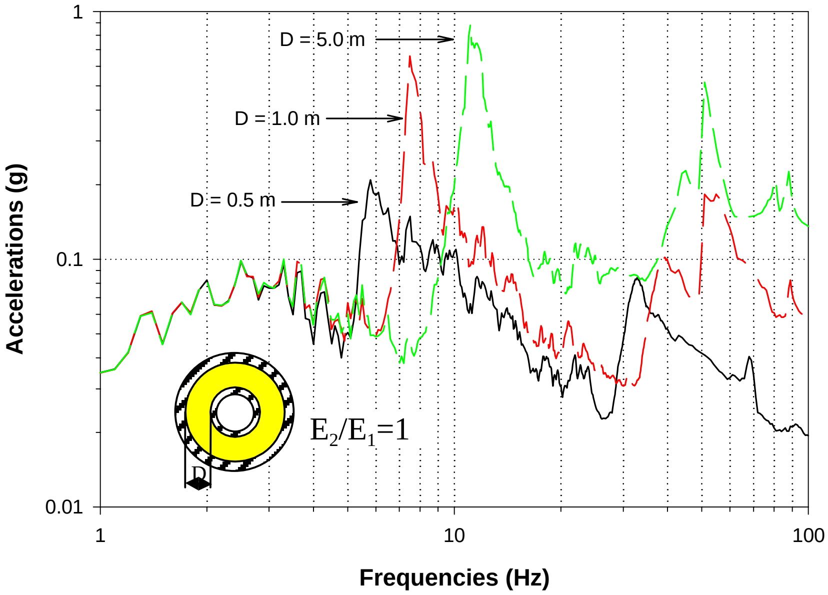


Fig. 7 Effects of Annulus Gap on Response Spectrum at Top of Inner Cylinder (R_1=2.0m, t_1=t_2=0.02m)

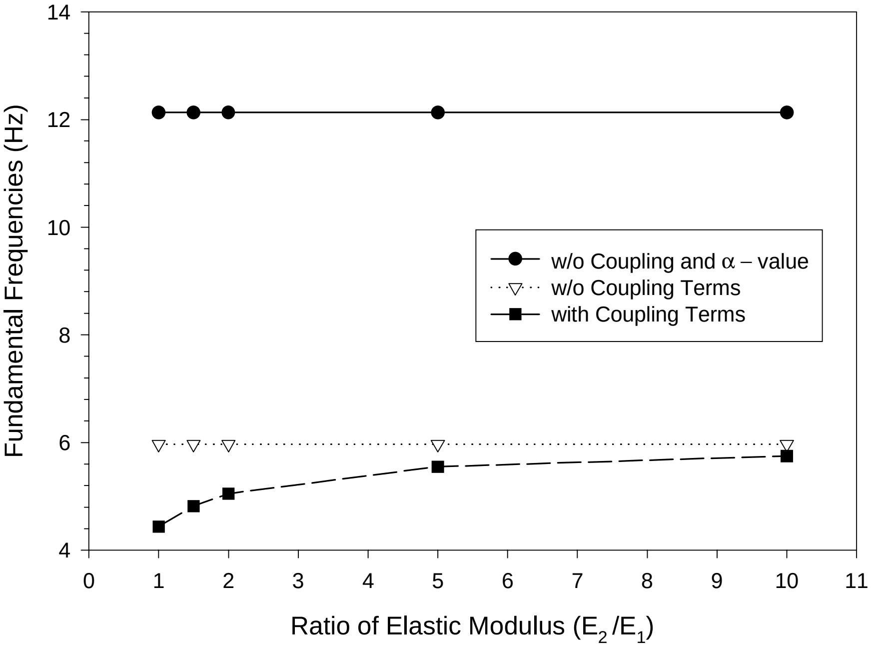


Fig. 8 Effects of Coupling Terms on Fundamental Frequency of Inner Cylinder

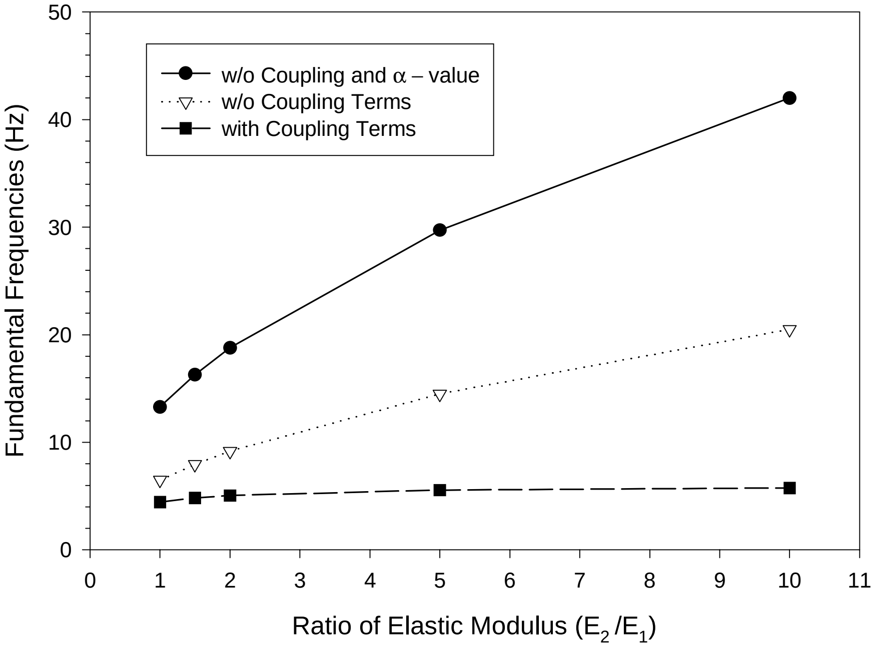


Fig. 9 Effects of Coupling Terms on Fundamental Frequency of Outer Cylinder

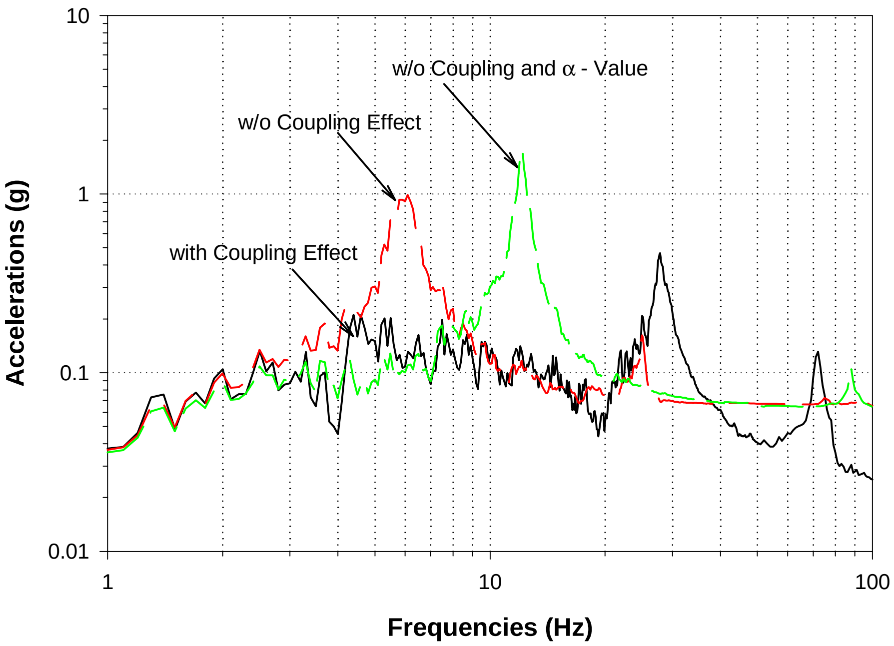


Fig. 10 Acceleration Response Spectra at Top of Inner Cylinder (R_1=2.0m, t_1=t_2=0.02m)

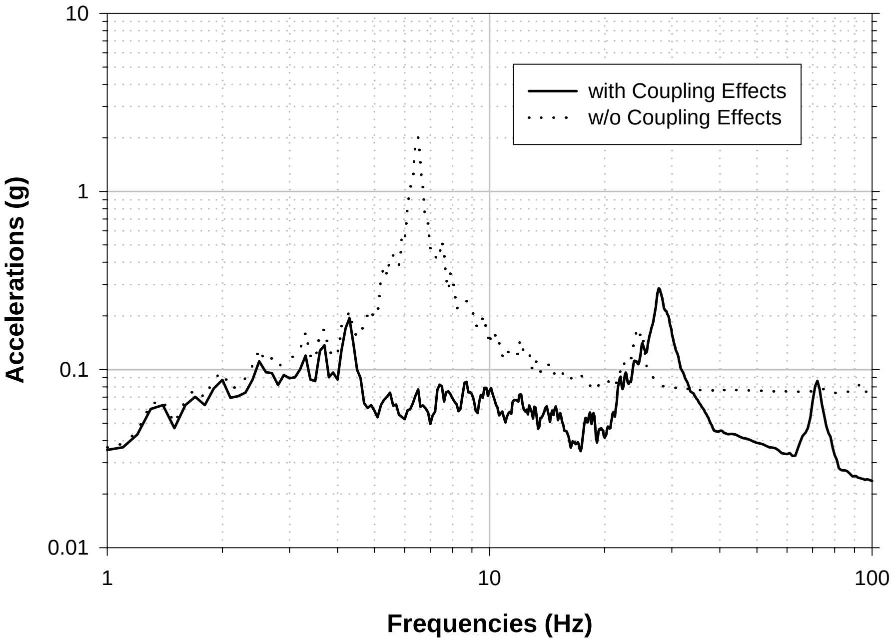


Fig. 11 Acceleration Response Spectra at Top of Outer Cylinder (R_1=2.0m, t_1=t_2=0.02m)