2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

노심지진 해석시 연계 질량항을 갖는 유체부가질량 행렬의 적용

Application of Consistent Fluid Added Mass Matrix to Core Seismic Analysis

구경회, 이재한

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 유체속에 잠긴 노심지진 해석시에 연계 질량항을 갖는 유체부가질량 행렬을 해석모델에 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 SAC-CORE3.0 코드에 장착하였다. 적용 예로써 7-덕트시스템의 액체금속로 노심집합체를 가정하고 SAC-CORE3.0 코드를 이용하여 공기중 및 연계 질량항 유무의 유체부가질량 행렬을 사용한 경우에 대하여 동특성과 시간이력 지진응답해석을 수행하였다. 해석에 사용된 유체부가질량 행렬은 본 연구에서 개발한 유한요소 프로그램인 FAMD 코드를 사용하여 구하였다. 동특성 해석결과, 유체부가질량 행렬에서 유체연계항을 모두 고려할 경우에 덕트집합체들 간의 연계가 발생하는 진동모우드가 나타났다. 지진응답해석결과 유체연계항은 덕트 간의 충돌응답과 이로 인한 변위응답에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, the application algorithm of a consistent fluid added mass matrix including the coupling terms to the core seismic analysis is developed and installed at SAC-CORE3.0 code. As an example, we assumed the 7-hexagon system of the LMR core and carried out the vibration modal analysis and the nonlinear time history seismic response analysis using SAC-CORE3.0. Used consistent fluid added mass matrix is obtained by using the finite element program of the FAMD(Fluid Added Mass and Damping) code. From the results of the vibration modal analysis, the core duct assemblies reveal strongly coupled vibration modes, which are so different from the case of in-air condition. From the results of the time history seismic analysis, it was verified that the effects of the coupled terms of the consistent fluid added mass matrix are significant in impact responses and the dynamic responses.

1. 서 론

노심지진해석은 노심을 구성하고 있는 집합체들 사이에 발생할 수 있는 수많은 간격 간의 충돌현상을 고려해야 하며 이러한 충돌현상은 매우 복잡한 비선형 특성을 나타낸다.

특히 기존 가압경수로 노심과는 달리 액체금속로용 노심구조는 육각단면을 갖는 수백개의 덕트집합체로 구성되어 있으며 이러한 집합체에는 서로 수 mm의 간격을 두고 중간 지지구조물 없이 외팔보 형태로 설치되어 있다. 덕트집합체들 간의 좁은 간격에 존재하는 유체는 지진시 덕트집합체의 유동저항을 야기하고 이는 유체부가질량 형태로 나타나 노심의 동특성 및 지진응답에 크게 영향을 주게 된다. 이러한 액체금속로 노심에 대한 지진응답 해석방법을 개발하고 개발된 방법들의 검증을 위하여 IAEA 주관하에 각국에서 개발된 노심지진해석코드의 상호비교 국제공동연구가 수행된 바 있다[1,2,3].

실제로 노심지진 해석모델에서 각각의 덕트집합체 거동을 평가하기 위해서는 유체속 덕트집합체에 각각 부여되는 유체부가질량을 결정하는 것이 매우 중요하다. 이들 덕트집합체의 유체부가질량은 덕트 간에 상호 연계특성을 가지며 이러한 연계 질량항을 포함한 유체부가질량행렬을 결정하는 유한요소 해석프로그램인 FAMD 코드가 개발된바 있다[4,5]. 실제 유체속 구조물의 진동이나 지진응답 해석에 있어서 유체의 영향을 고려하는 방법에는 주로 유체영향을 절점의 집중질량으로 부여하거나 단순 동축 원통일 경우 Fritz 식에 의한 유체부가질량 계산결과를 사용하고 있다[6]. 그러나 노심과 같이 유체속 구조물이 아주 많을 경우에 이들 각각의 연계부가질량 항을 포함하는 유체부가질량 행렬을 직접 해석모델에 적용하는 방법은 아직 발표된 바가 없다. 본 연구에서는 FAMD 코드의 계산결과인 유체부가질량 행렬을 노심지진 해석모델에 직접 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 SAC-CORE3.0[7] 코드에 장착하였다. 적용 예로서 FAMD 코드를 이용하여 7-덕트시스템에 대한 유체부가질량 행렬 결정하고 SAC-CORE 코드를 이용하여 공기중 및 연계 질량항 유무를 갖는 유체부가질량 경우에 대하여 시간이력 지진해석을 수행하여 개발된 알고리즘의 적용성을 기술하였다.

2. 유체부가질량 행렬의 적용 알고리즘

일반적으로 유체 속에 잠긴 임의 구조물 형상(Fig. 1)에 대한 유체부가질량 해석은 2차원 유체-구조물 상호작용 해석을 통하여 구할 수 있다[4]. 이때 구한 유체부가질량 행렬

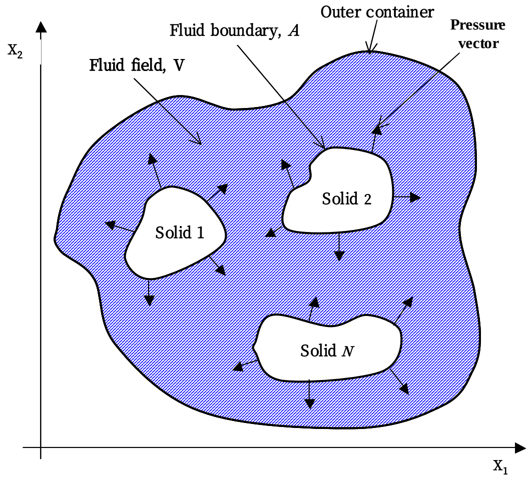


Fig. 1 Immersed Bodies in Confined Fluid

은 대각선 행렬과 구조물들 사이의 상호작용을 나타내는 연계항(Coupling term)을 가지게 된다. 본 연구에서는 이러한 연계 질량항들을 노심지진 해석모델에 적용하기 위한 알고리즘을 개발하고자 한다.

실제로 원자로 노심에 대한 지진해석은 Single row model이 사용되며 Fig. 2와 같이 보요소를 이용한 Stick model로 표현된다. 그림에서 n은 노심갯수이며 m은 보모델당 절점갯수이다. 2차원 유체-구조물 상호작용 해석에서 구한 유체부가질량 행렬을 노심지진모델에 적용시키기 위해서는 먼저 각 노심들 간의 연계작용 요소를 만들 수 있는 절점들이 필요하다. 이를 위하여 각 노심의 절점들은 Fig. 2에서와 같이 같은 높이에서의 절점을 가지고 있도록 모델링 되어야 한다.

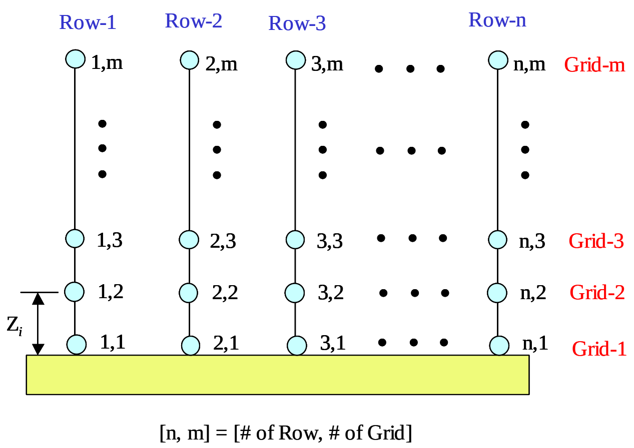


Fig. 2 Stick Model for Core Seismic Analysis

위의 해석모델에서 같은 높이에서의 절점들은 하나의 Grid로 연결되는 유체부가질량 행렬을 가지게 된다. i번째 Grid에서의 유체부가질량 행렬[CFAM]은 다음식으로 주어진다.

$$[\mathrm{CFAM}]_i = L_i \times \begin{bmatrix} M_{1,i}^{1,i} & M_{2,i}^{1,i} & M_{3,i}^{1,i} & \cdots & M_{n,i}^{1,i} \\ M_{1,i}^{2,i} & M_{2,i}^{2,i} & M_{3,i}^{2,i} & \cdots & M_{n,i}^{2,i} \\ M_{1,i}^{3,i} & M_{2,i}^{3,i} & M_{3,i}^{3,i} & \cdots & M_{n,i}^{3,i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{1,i}^{n,i} & M_{2,i}^{n,i} & M_{3,i}^{n,i} & \cdots & M_{n,i}^{n,i} \end{bmatrix}_i , \quad i = 1,2,3,\ldots,m \qquad (1)$$

위의 식에서 하첨자 i은 Grid 번호를 나타내며 각 Grid 요소 길이 Li은 Fig. 2의 보요소 길이들로부

터 다음과 같이 주어진다.

$$L_i = (Z_{i-1} + Z_i)/2 \ , \ i = 1, 2, 3, ..., m \tag{2}$$

위의 식 (2)에서 Zo와 Zm은 영이다.

위의 식 (1)에서 Grid 위치마다 구조물 사이의 유체간격이 다른 경우에는 유체부가질량 행렬도 따로 구해서 구간별로 적용할 수 있다.

위의 각 Grid 요소에 대한 유체부가질량 행렬은 개발된 노심지진해석 프로그램인 SAC-CORE3.0 코드에서 질량 시스템행렬에 부가된다.

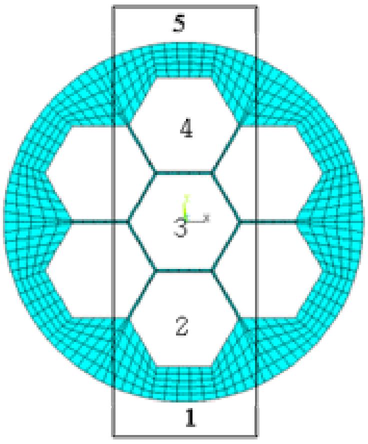


Fig. 3 7-Hexagon System

예를 들어 Fig. 3과 같이 7개의 덕트집합체로 구성된 액체금속로 노심의 경우 노심지진 해석모델은 외부원통을 포함하는 5개의 Stick 모델을 갖는 Single Row Model로 표현될 수 있으며 이때 노심지진 해석모델에 적용되는 식 (1)의 유체부가질량 행렬은 다음과 같이 5x5 행렬이 된다.

$$\begin{bmatrix} M_{1,i}^{1,i} & M_{2,i}^{1,i} & M_{3,i}^{1,i} & M_{4,i}^{1,i} & M_{5,i}^{1,i} \\ M_{1,i}^{2,i} & M_{2,i}^{2,i} & M_{3,i}^{2,i} & M_{4,i}^{2,i} & M_{5,i}^{2,i} \\ M_{1,i}^{3,i} & M_{2,i}^{3,i} & M_{3,i}^{3,i} & M_{4,i}^{3,i} & M_{5,i}^{3,i} \\ M_{1,i}^{4,i} & M_{2,i}^{4,i} & M_{3,i}^{4,i} & M_{4,i}^{4,i} & M_{5,i}^{4,i} \\ M_{1,i}^{5,i} & M_{2,i}^{5,i} & M_{3,i}^{5,i} & M_{4,i}^{5,i} & M_{5,i}^{5,i} \end{bmatrix}_i \tag{3}$$

액체금속로 노심의 경우 Grid 높이마다 유체간격이 일정하기 때문에 2차원 유체-구조물 상호작용 해석을 통해 구해진 위의 식 (3)은 Grid 번호, i에 상관없이 일정하다.

3. 적용 예

본 연구의 적용 예로써 Fig. 4의 평면도와 같이 7개의 덕트집합체로 구성된 액체금속로 노심을 사용하였다. 덕트집합체는 Fig. 5의 정면도에서와 같이 육각형 단면을 갖는 덕트본체와 하부판에 고정되는 Nosepiece로 가정하였다. 덕트집합체 총 길이는 100cm이며 이중에 Nosepiece의 길이는 10cm이다. 덕트의 Flat-to-Flat 길이는 Fig. 5와 같이 모두 4cm이며 두께는 0.2cm이다. 덕트 간의 간격은 0.2cm이고 외곽쪽 덕트와 원통실린더 간의 간격은 10cm로 하였다.

해석에 사용된 덕트집합체는 A-Type과 B-Type의 두 종류로 하였으며 이들 덕트는 Nosepiece 직경을 달리 함으로서 강성을 다르게 설정하였다. A-Type 덕트의 Nosepiece 직경은 1cm이고 B-Type은 1.4cm로 하여 외곽 덕트인 B-Type이 A-type보다 강성을 크게 하였다.

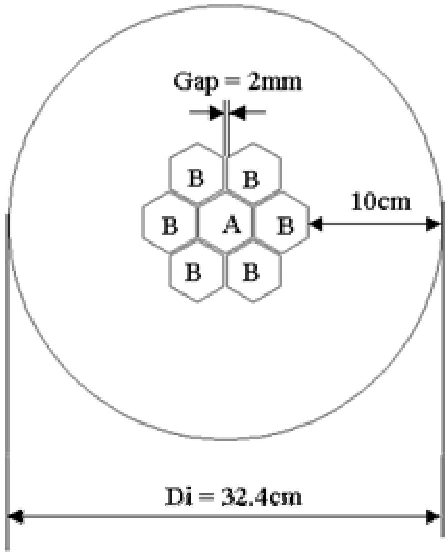


Fig. 4 Used 7-Hexagon System(Top View)

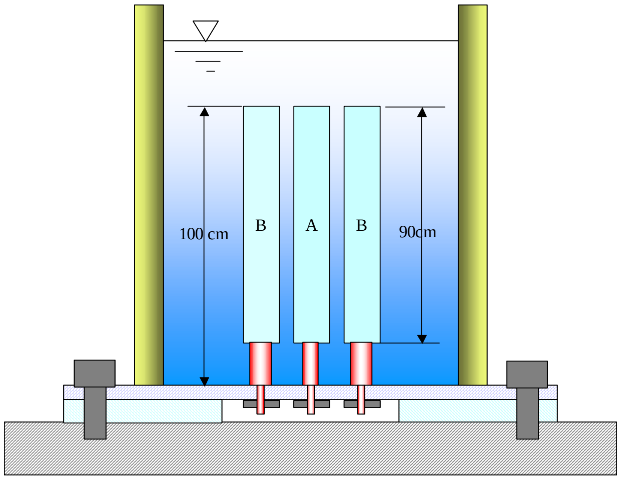


Fig. 5 Used 7-Hexagon System (Front View)

3.1 유체부가질량 행렬 결정

주어진 7-Hexagon System에 대한 유체부가질량 행렬을 구하기 위하여 FAMD 코드를 사용하였다.

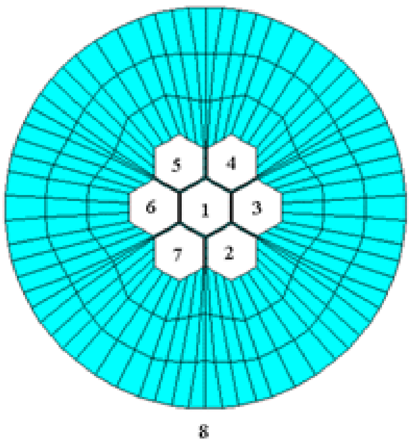


Fig. 6 FEM Model for CFAM Calculation

Fig. 6은 유체-구조물 상호작용 해석에 사용된 유한요소 모델을 나타낸다. 해석에 사용된 절점수는 1050개이며 요소수는 288개, 레이놀즈수 Re=3000이다.

Table 1은 계산된 유체부가질량 행렬을 나타낸 것으로 표에서와 같이 7개의 덕트 중에서 유체부가질량은 중앙부 덕트 1에서 $M_1^1 = 10.55kg$ 으로 가장 크게 나타났다. 중앙부 덕트 1의 거동에 대한 덕트 3과 덕트 6의 연계 유체부가질량은 $M_3^1 = M_6^1 = -4.75kg$ 으로

M_1^1에 비해 약 절반으로 비교적 높게 나타났다.

Table 1. Obtained Consistent Fluid Mass Matrix (kg)

	1-X	2-X	3-X	4-X	5-X	6-X	7-X	8-X
1-X	10.55							
2-X	0.37	4.72						
3-X	-4.75	1.18	7.06					
4-X	0.37	0.43	1.14	4.72				
5-X	0.37	-0.07	-1.10	-3.10	4.72			
6-X	-4.75	-1.11	-1.15	-1.11	1.18	7.06		
7-X	0.37	-3.10	-1.10	-0.07	0.43	1.14	4.72	
8-X	-4.1	-4.18	-2.88	-4.18	-4.18	-2.88	-4.18	108.10

3.2 노심지진 해석모델

Fig. 7은 노심지진해석을 위한 Single Row 모델을 나타낸 것으로 사용된 절점수는 35개, 보요소수는 18개, Gap 요소수는 4개, 그리고 유체부가질량행렬을 적용하기 위한 Grid 수는 6개이다.

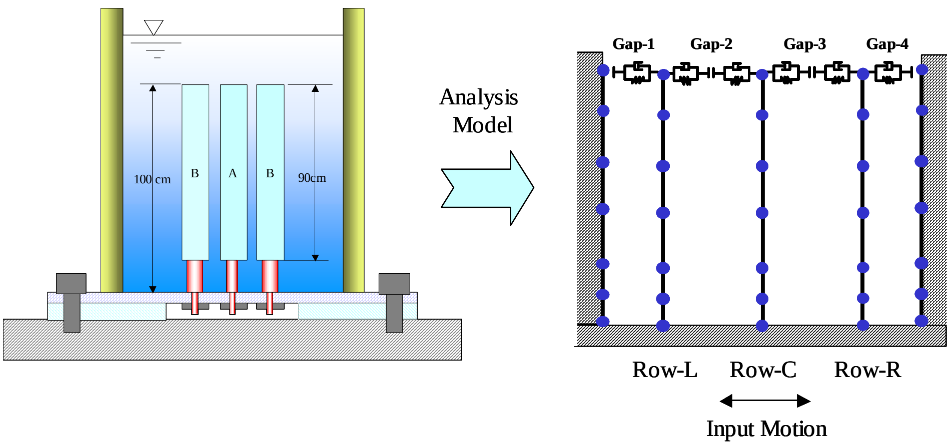


Fig. 7 Used Core Seismic Analysis Model

지진 거동시에 덕트들 사이의 충돌은 덕트집합체의 특성상 상단 꼭대기에서만 발생하는 것으로 가정하였으며 Fig. 7에서와 같이 덕트 상단에는 충돌강성과 감쇠요소를 갖는 Gap 요소를 고려하였다. 외곽 덕트인 Row-L, Row-R과 원통용기와의 Gap 크기은 100mm이며 Row-C과의 Gap 크기는 2mm이다.

덕트 사이의 충돌강성과 감쇠값은 덕트 집합체의 지진응답에 크게 영향을 미칠 수 있

으며 따라서 신중하게 결정되어야 한다. 일반적으로 덕트 충돌강성은 시험적 방법에 의하여 구할 수도 있으나 본 연구에서는 수치해석적 방법을 사용하였다.

Fig. 8과 같이 두개의 덕트강성 사이에 가정되는 충돌강성은 다음 식으로 결정될 수 있으며

$$\frac{1}{\mathbf{K}_{gap}} = \frac{1}{2\mathbf{K}_1} + \frac{1}{2\mathbf{K}_2} \tag{4}$$

충돌감쇠 값은 다음식으로 결정될 수 있다.

$$\mathbf{C}_{gap} = \mathbf{K}_{gap}\frac{(1-e^2)t}{\pi} \tag{5}$$

위의 식에서 **K**gap는 충돌강성, **C**gap는 충동감쇠, t는 충돌시간, 그리고 e는 반발계수이다.

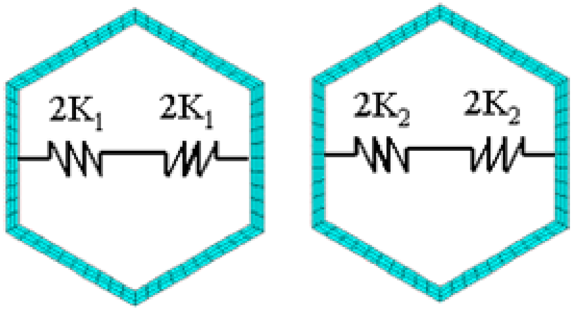
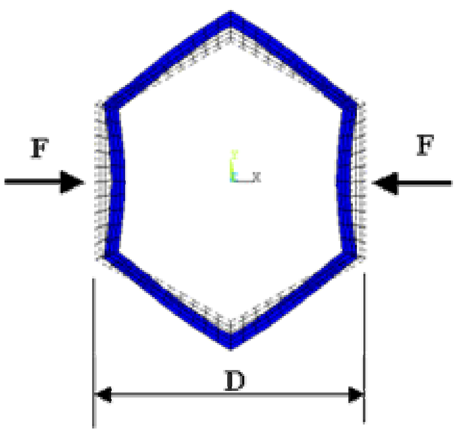


Fig. 8 Concept of Calculating the Impact Stiffness

Fig. 9는 유한요소해석을 이용한 덕트 강성해석 방법을 나타낸 것으로 이로부터 덕트 강성은 다음 식과 같이 구해진다.

$$\mathbf{K}_{el} = \frac{\mathbf{F}}{\Delta\mathbf{D}} \tag{6}$$

위의 수치해석을 통하여 구한 덕트 강성 및 감쇠 값은 다음과 같다.



$$\mathbf{K}_{gap} = \mathbf{K}_{el} = \frac{\mathbf{F}}{\Delta\mathbf{D}} = \frac{1000}{8.2062E-6} = 121.8\,MN/m$$

$$\mathbf{C}_{gap} = \mathbf{K}_{gap}\frac{(1-e^2)t}{\pi} = 121.8E6\frac{(1-0.55^2)0.1}{\pi} = 2.7\,MN\,s/m$$

Fig. 9 Stiffness Analysis for Hexagon Duct Section

3.3 동특성 해석에의 적용

주어진 해석모델에 대여 공기중 조건, 유체부가질량 행렬에서 연계 질량항을 무시한 경우, 그리고 연계항을 모두 고려한 경우에 대한 동특성 해석을 개정된 SAC-CORE3.0 코드를 사용하여 수행하였다.

Table 2는 각 경우들에 대한 고유진동수 해석결과를 나타낸 것이다. 공기중인 경우에 Row-L과 Row-R의 1차고유진동수는 12.3Hz, Row-C는 6.4Hz로 나타났으며 덕트들은 각각 독립된 고유진동수를 갖는다. 물속인 경우에 유체부가질량 행렬의 연계항들을 무시하고 대각선 항들만 고려한 경우는 고유진동수가 크게 줄어들어 Row-L과 Row-R의 1차고유진동수는 6.7Hz, Row-C는 3.0Hz로 낮아졌다. 반면에 연계 질량항을 고려한 경우에 Row-L과 Row-R의 1차고유진동수는 6.3Hz, 2차고유진동수는 9.3Hz이고 Row-C의 1차고유진동수는 2.9Hz, 2차고유진동수는 9.3Hz로 나타났다. 진동모우드 형상을 살펴보면 공기중인 경우에는 Fig. 10과 같이 덕트집합체가 각각 전형적인 보 모우드형상을 나타낸다. 그러나 물속인 경우에는 유체부가질량 행렬의 연계 질량항으로 인해 Fig. 11과 같이 덕트집합체가 모두 연계된 모우드 형상을 나타낸다. 1차 진동모우드(2.9Hz)는 상대적으로 강성이 약한 Row-C 덕트의 1차 굽힘모우드가 지배적으로 나타나며 2차 진동모우드는 Row-L과 Row-R이 서로 반대 위상을 가지는 굽힘모우드(6.3Hz)가 지배적으로 나타난다. 3차 진동모우드는 덕트 모두 동위상을 가지고 연계진동을 하는 굽힘모우드(9.3Hz)로 나타난다.

따라서 물속에서 노심집합체의 동특성은 유체-구조물 상호작용의 영향으로 인하여 고유진동수 뿐만 아니라 진동모우드들도 크게 달라지는 것으로 나타났다.

Table 2. Comparison of Natural Frequencies for Each Case (Hz)

	Row-L			Row-C			Row-R		
	Air	Water (Diagonal)	Water (CFAM)	Air	Water (Diagonal)	Water (CFAM)	Air	Water (Diagonal)	Water (CFAM)
1st	12.3	6.7	6.3	6.4	3.0	2.9	12.3	6.7	6.3
2nd	186.5	96.4	9.3	164.1	71.2	9.3	186.5	96.4	9.3
3rd	550.3	247.5	64.0	423.9	157.3	64.0	550.3	247.5	64.0

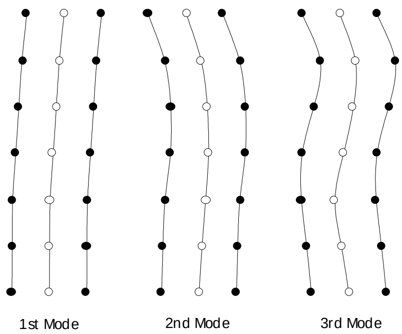


Fig. 10 Mode Shapes in Air

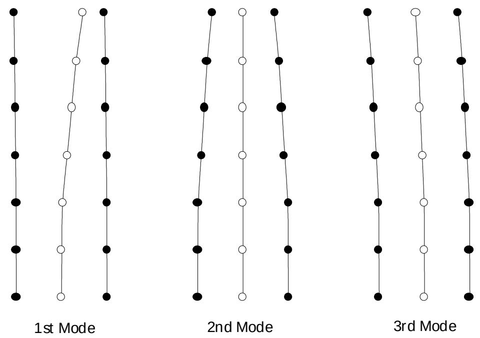


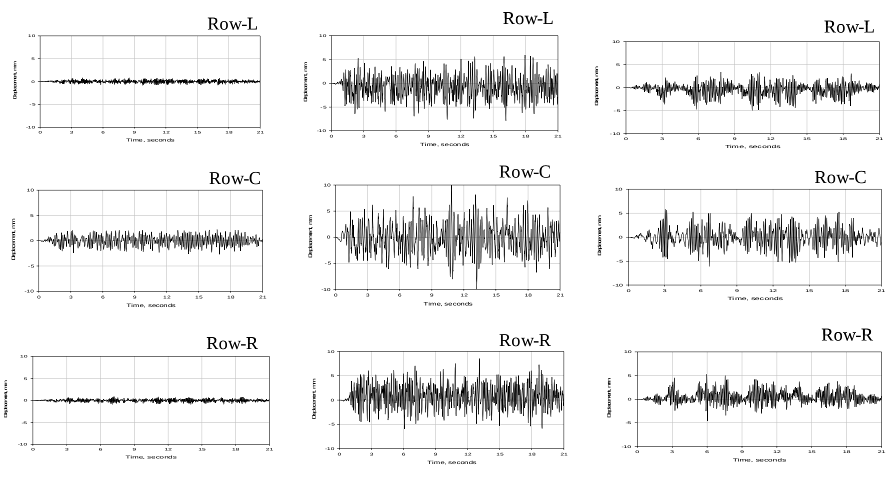
Fig. 11 Mode Shapes in Water

3.4 노심지진응답 해석에의 적용

본 연구에서 제안한 연계 질량항을 갖는 유체부가질량 행렬을 노심지진 해석모델에 적용하여 비선형 시간이력 노심지진응답 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 입력지진 파형은 US NRC Reg. 1.60에 따라서 생산된 0.15g를 사용하였다. 사용된 입력지진의 가속도 층응답스펙트럼을 나타낸 것으로 강주파수성분이 2Hz ~ 10Hz 사이에 존재한다. 해석에 사용된 시간간격은 2.0E-3초이며 총 해석시간은 21초이다. 덕트집합체의 구조감쇠는 3% 비례감쇠를 사용하였다.

Fig. 12는 공기중, 연계 질량항을 무시한 유체부가질량 행렬, 그리고 연계 질량항을 고려한 유체부가질량 행렬 조건에 대하여 각각 덕트상단 절점에서의 시간이력 변위응답 해석결과를 나타낸 것이다.



(a) In Air (b) In Water w/o Coupling Terms (c) In Water with CFAM

Fig. 12 Displacement Seismic Responses at Top Nodes

그림에서와 같이 공기중에 비하여 물속에서의 노심변위응답이 크게 나타나며, 특히 연계 질량항을 무시하고 대각선 행렬의 유체부가질량만을 고려할 경우에 노심지진응답이 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 13에서와 같이 물속에서 덕트 간의 충돌거동이 매우 크게 일어나 변위응답을 증폭시킨 것으로 판단된다. 해석결과에서와 같이 실제로 유체부가질량의 연계 질량항을 무시하고 대각선 항만 고려할 경우에는 해석모델은 관성질량이 크게 늘어나 고유진동수가 낮아짐으로 인해 변위응답이 증가하는 것으로 나타난다. 따라서 유체속 구조물의 진동해석시 유체부가질량의 연계 질량항은 지진응답에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 유체의 연계 질량항은 전체 진동모우드에도 영향을 미치기 때문에 Fig. 13과 같이 덕트 간의 충돌응답에도 크게 영향을 미칠 수 있다.

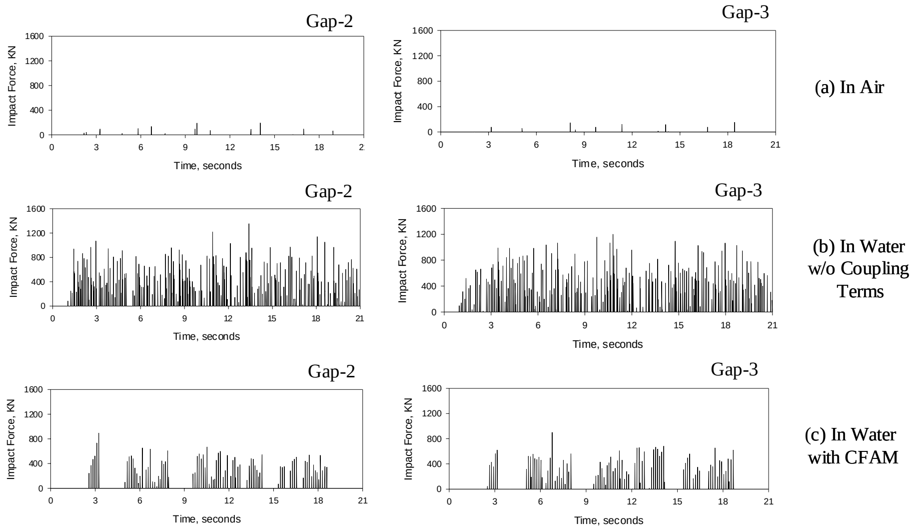
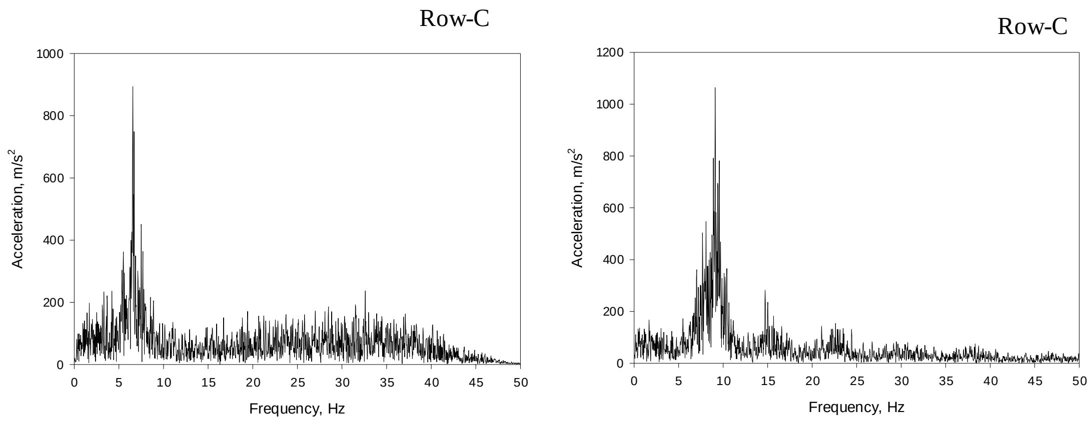


Fig. 13 Impact Seismic Responses at Gaps

Fig. 14는 Row-C 상단절점의 가속도응답에 대한 50Hz Low pass 필터링을 사용한 FFT 스펙트럼분석 결과이다. 그림에서와 같이 공기중인 경우에 1차 고유진동수 6.4Hz에서 피크응답이 나타나며 물속의 경우에는 2차 고유진동수인 9.3Hz에서 피크응답이 나타나며 1차 고유진동수인 2.9Hz가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 13의 충돌응답에서와 같이 충돌이 자주 일어남으로 인해 Row-C 덕트가 주변 덕트와 접촉시간이 길어져 1차 모우드 응답이 사라지고 Fig. 11에서와 같이 모든 덕트가 동위상을 가지는 3차 진동모우드(9.3Hz)가 지배적으로 나타났기 때문이다. 실제로 덕트간의 간격이 매우 커서 충

돌이 일어나지 않는다고 가정할 경우 Fig. 15와 같이 1차 및 2차 진동모우드에 해당하는 피크응답이 모두 나타난다.



(a) In Air (b) In Water

Fig. 14 FFT Spectrum Analysis Results for Row-C

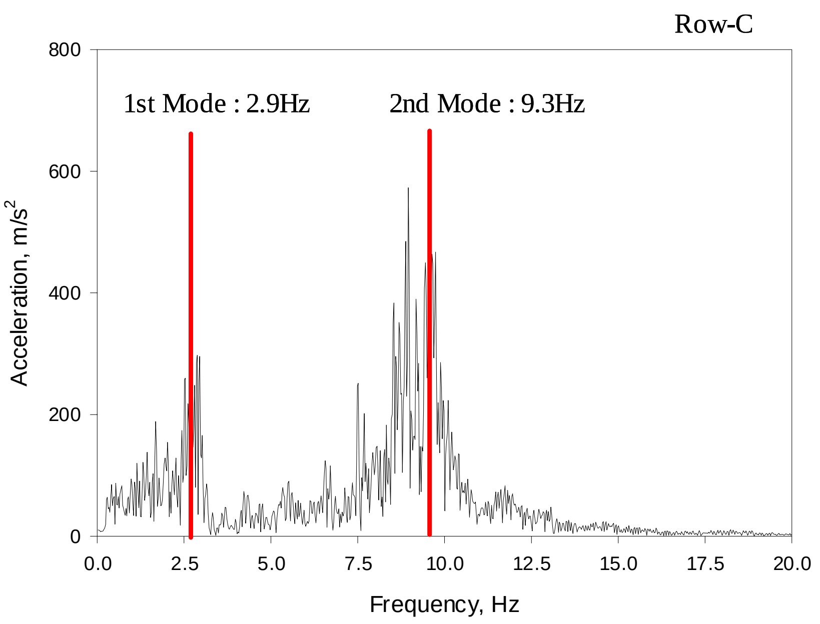


Fig. 15 FFT Spectrum in Case of No-Impact Condition, in Water

4. 결 론

본 연구에서는 노심지진해석에 있어서 FAMD 코드 등으로 계산된 연계 질량항을 포

함한 유체부가질량을 실제 노심지진 해석모델에 적용하는 알고리즘을 개발하고 이를 SAC-CORE3.0 코드에 장착하였다. 개발된 알고리즘을 적용하여 7-덕트 액체금속 원자로 노심에 적용한 결과, 유체부가질량 행렬이 갖는 연계 질량항으로 인해 덕트집합체 간에 서로 연계된 동특성을 나타내었다. 그리고 지진응답해석결과 연계 질량항들은 덕트 간의 충돌응답과 변위응답 등에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며 특히 연계 질량항이 없이 유체부가질량 만을 절점에 부여하는 노심지진 해석방법은 매우 보수적인 노심변위 응답 결과를 초래할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Intercomparison of Liquid Metal Reactor Seismic Analysis Codes, Volume 1: Validation of Seismic Analysis Codes Using Reactor Core Experiments, IAEA-TECDOC-798, 1993

[2] Intercomparison of Liquid Metal Reactor Seismic Analysis Codes, Volume 2: Verification and Improvement of Reactor Code Seismic Analysis Codes Using Core Mock-up Experiments, IAEA-TECDOC-829, 1994

[3] Intercomparison of Liquid Metal Reactor Seismic Analysis Codes, Volume 3: Comparison of Observed Effects with Computer Simulated Effects on Reactor Codes from Seismic Disturbances, IAEA-TECDOC-882, 1995.

[4] G.H Koo and J.H. Lee, “Development of FAMD Code to Calculate the Fluid Added Mass and Damping of Arbitrary Structures Submerged in Confined Viscous Fluid,” KSME International Journal, Vol.17, No.3, pp.457-466, 2003.

[5] G.H. Koo and J.H. Lee, ”Finite Element Analysis for Evaluation of Viscous and Eccentricity Effects on Fluid Added Mass and Damping,” Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 7, No.2, pp.21-27, 2003.

[6] R.J. Fritz, “The Effect of Liquids on the Dynamic Motions of Immersed Solids,” Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, pp. 167-173, 1972.

[7] G.H. Koo and J.H.Lee, Development of SAC-CORE2.0 for Core Seismic Analysis, KAERI/TR-2312/2002, 2002.