

# 모델차수축소법을 이용한 유체 구조 연성해석

## Fluid-Structure Interaction Analysis using Model Order Reduction

하경록\* · 최영인\* · 임승호\* · 박영필\* · 박노철\* · 박경수†

Kyungrok Ha, Young-In Choi, Seungho Lim, Young-Pil Park, No-Cheol Park, and Kyung-Su Park

### 1. 서 론

일반적으로 선박이나 원자로 내부구조물과 같이 유체와 구조가 연성 되어 있는 시스템은 외부하중에 지속적으로 노출된다. 따라서 동특성 해석을 통한 구조적 건전성을 확보하는 것이 중요하다. 동특성 해석에는 유한요소법이 널리 사용되고 있는데, 유체와 구조가 연성 되어 있는 시스템은 보통 매우 큰 해석 자유도를 가지고 있기 때문에 많은 해석 비용과 시간이 소요된다. 그러므로 유체-구조 연성 시스템에 대한 강제진동 응답 해석에는 많은 어려움이 따른다. 그러나 진동계의 해석 시 해석 모델의 자유도를 축소하여 해석해도 초기 시스템과 같은 응답을 나타낸다면 큰 비용과 시간의 절감 효과를 가지고 강제진동 응답 해석에도 매우 용이할 것이다. 큰 해석 자유도를 가지는 시스템의 자유도를 줄여 해석하는 수치해석기법에는 여러 가지가 있는데, 최근 모델차수축소법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 모델차수축소법에 대해서 간략히 설명하고 구조와 유체가 연성된 시스템의 모드해석과 조화해석에 대하여 모델차수축소법을 적용한다. 이를 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 활용하여 셀과 유체가 연성된 원통형 유한요소해석 모델을 구축한다. ANSYS를 통해 유체-구조 연성모델에 대한 시스템 행렬을 추출하고, 수치해석 프로그램인 MATLAB을 활용하여 모델차수축소법을 적용하였다. 모델차수축소법을 적용한 해석결과를 전체 해석 자유도를 갖는 모델의 해석 결과와 비교하여 유체와 연성된 구조에 대한 모델차수축소법의 적용성을 알아보고, 원자로 내부구조물과 유사한 시스템에 적용하기 위한 기초해석 자료로 활용한다.

### 2. 모델차수축소법

† 박경수; 연세대학교 기계공학과  
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr  
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460  
\* 연세대학교 기계공학과

진동해석을 위한 일반적인 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} [\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} &= \{\mathbf{b}\}u(t) \\ \{\mathbf{y}(t)\} &= [\mathbf{L}]\{\mathbf{x}(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

(2)의 식을 만족하는 투영행렬( $T$ )는 Krylov Subspace에 의해 구해지며, 초기 모델의 응답  $x(t)$ 를 축소된 자유도 모델의 응답  $z(t)$ 로 축소시켜 나타낸다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &\equiv \mathbf{V}\mathbf{z}(t) \\ \mathbf{x}(t) \in \mathfrak{R}^N, \mathbf{z}(t) \in \mathfrak{R}^n, N \gg n \end{aligned} \quad (2)$$

모델차수축소법에 의하여 축소된 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [\mathbf{M}_r]\{\ddot{\mathbf{z}}(t)\} + [\mathbf{C}_r]\{\dot{\mathbf{z}}(t)\} + [\mathbf{K}_r]\{\mathbf{z}(t)\} &= \{\mathbf{b}_r\}u(t) \\ \{\mathbf{y}(t)\} &= [\mathbf{L}_r]\{\mathbf{z}(t)\} \\ [\mathbf{M}_r] &= [\mathbf{V}]^T [\mathbf{M}] [\mathbf{V}], [\mathbf{C}_r] = [\mathbf{V}]^T [\mathbf{C}] [\mathbf{V}], [\mathbf{K}_r] = [\mathbf{V}]^T [\mathbf{K}] [\mathbf{V}] \\ \{\mathbf{b}_r\} &= [\mathbf{V}]^T \{\mathbf{b}\}, [\mathbf{L}_r] = [\mathbf{L}] [\mathbf{V}] \end{aligned} \quad (3)$$

축소되기 전과 후의 운동방정식을 비교해 보았을 때, 자유도는  $N$  개에서  $n$  개로 줄어들었지만, 입력에 대한 응답은 수치적으로 근사화됨을 알 수 있다. 이를 통하여 축소모델을 이용하여 동적 해석을 수행하면 적은 자유도의 모델을 효율적으로 해석하면서 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 수치 해석 모델 및 결과

#### 3.1 유한요소해석 모델

상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유한요소해석 모델을 구축하였다. Fig. 1 (a)와 같이 셀로 이루어진 구조에 Fig. 1 (b)와 같이 유체를 채워 넣은 유체-구조 연성 모델을 구축하였다. 구조

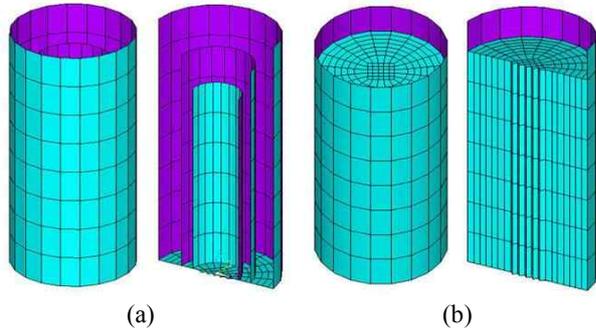


Fig. 1 Finite element model

Table 1. Natural frequency (unit : Hz)

Mode	Full model	8 DOF model
1 <sup>st</sup> Mode	108.5	108.5
2 <sup>nd</sup> Mode	139	139
3 <sup>rd</sup> Mode	233.66	233.66
4 <sup>th</sup> Mode	259.2	259.2
5 <sup>th</sup> Mode	347.47	359.47

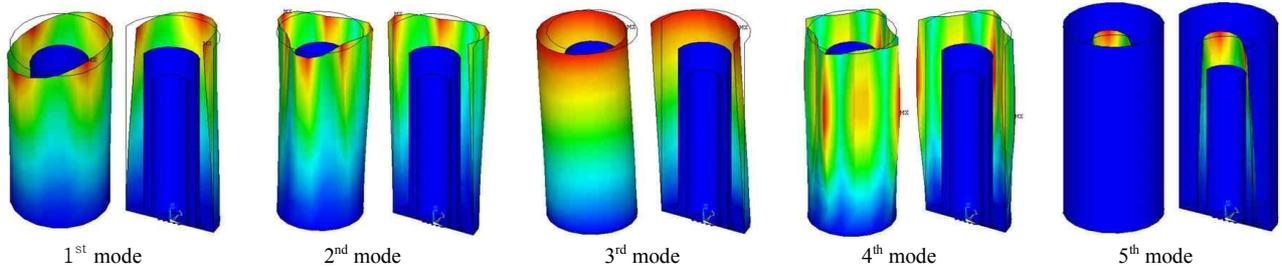


Fig. 2 Mode shape

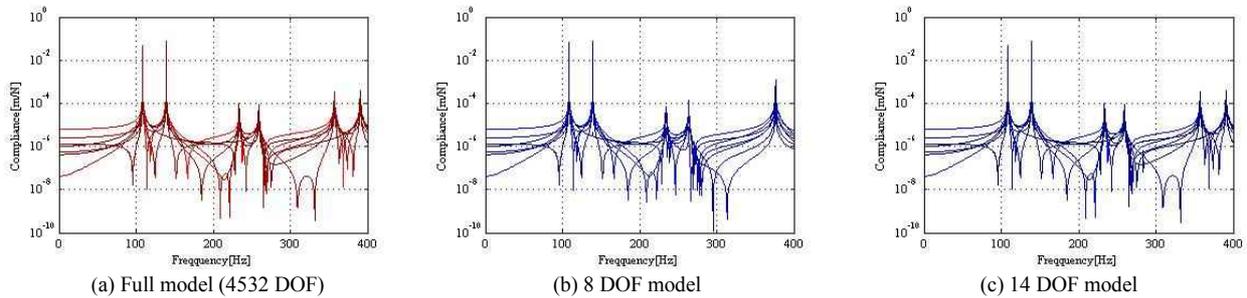


Fig. 3 Harmonic response

영역에는 SHELL63 요소를 사용하였고, 유체영역에는 FLUID30 요소를 사용하였다. FLUID30 요소를 사용하여 시스템 행렬이 비대칭이므로, 비대칭 행렬에 대한 고유치 해석 알고리즘을 이용하여 고유진동수를 추출하였다.

### 3.2 결과

Fig. 2 는 수치해석 모델의 모드 형상을 나타낸다. 더불어 Table 1 은 전체 모델로 해석을 수행했을 때와 모델차수축소법을 통해 축소된 모델로 해석을 수행했을 때의 고유진동수를 나타낸다. 4 차 모드 이하의 저주파에서는 두 모델의 해석결과가 매우 근사함을 확인할 수 있다.

Fig. 3 은 전체 모델로 해석을 수행했을 때와 모델차수축소법을 통해 축소된 모델로 해석을 수행하였을 때의 조화응답을 나타낸다. 8 자유도로 모델을 축소하여 해석을 수행했을 때는 4 차 모드 이하의 응답이 일치하는 것을 확인할 수 있고, 14 자유도로 축

소하여 해석을 수행했을 때는 400Hz 까지의 전 주파수 대역에서 응답이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이 해석 결과를 통해 모델차수축소법을 이용하여 해석을 수행하면 유체와 연성된 구조의 동특성을 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있고, 추후 원자로 내부구조물과 같은 실제 모델에 모델차수축소법을 적용하여 구조의 동특성을 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- (1) 한정삼, 2006, “ 모델차수축소법을 이용한 효율적인 진동해석”, 대학기계학회 논문집 A 권, 제 30 권 제 3 호, pp. 310~317
- (2) 한정삼, 2005, “ 모델차수축소법을 이용한 너클의 효율적인 진동해석”, 대학기계학회 경북지부 2005 년도 춘계학술대회 논문집, pp. 18~22