

유체-구조 연성 해석의 상사성을 이용한 원자로내부구조물의 동특성 예측

Dynamic Characteristics Prediction of Reactor Internals Using Similarity of Fluid-structure Interaction Analysis

최영인* · 임승호* · 박영필* · 박노철* · 박경수† · 정경훈** · 박진석**

Youngin Choi, Seungho Lim, Young-Pil Park, No-Cheol Park, Kyeong-Su Park,
Kyeong-Hoon Jeong, Jin-Seok Park

1. 서 론

최근 원자력 에너지에 대한 의존도가 높아짐에 따라 높은 안전성과 경제성을 가진 원자로의 개발이 활발하게 이루어 지고 있다. 현재 한국원자력연구원은 일체형 가압 원자로(SMART)를 개발 중에 있으며 이는 압력 용기 내부에 주요 구조물들을 포함시키며 안정성을 크게 향상시켰다. 하지만 여전히 파괴에 대한 위험성은 존재하기 때문에 확실한 안정성 확보를 위해서 구조물의 동특성을 파악하는 일이 중요하다. 더욱이 원자로 내부 구조물의 경우 냉각수와 접해 있기 때문에 유체의 부가질량 효과를 고려한 유체-구조 연성조건 해석이 필요하다. 이를 위해 1/12 크기의 축소 모델을 제작하여 모드 시험을 수행하였고 시험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 동특성을 추출하였다.

실제 원자로 내부구조물의 동특성은 유체-구조 연성 해석의 상사성을 이용하여 축소 모형의 동특성을 통해 예측할 수 있다. 본 논문에서는 원통구조물의 유한요소해석을 수행하였고 상사성을 이용하여 형상은 같지만 크기와 재질이 다른 원통 구조물의 고유진동수를 계산하였다. 그리고 동일한 방법을 실제 원자로 내부구조물에 적용해 보았고 그 결과를 확인하였다.

2. 상사성 해석

2.1 보정계수 및 NAVMI인자

원자로와 같은 대형구조물의 경우 직접 모드 시험을 수행하는 것은 불가능하기 때문에 축소모형의 모드 시험 결과를 통해 실제 구조물의 고유진동수를 예측하게 된다. 이를 위해서는 상사성 해석이 필요하며 공기 중 구조물의 경우에는 물성치와 척도의 보정을 통해 고유진동수를 예측할 수 있다. 실제 모델의 공기 중 고유진동수는 영률 보정계수 ϵ , 밀도 보정계수 ζ_p , 척도계수(Scale Factor) κ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{o,m} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\epsilon}{\zeta_p}} f_{o,s} \quad (1)$$

구조물이 유체와 접해 있을 경우 유체의 부가질량 효과로 인해 공기 중과는 다른 방법의 계산이 필요하다. 유체의 부가질량 효과가 고유진동수에 미치는 영향을 Kwak⁽¹⁾은 NAVMI(Non-dimensional Added Virtual Mass Incremental Factor)계수를 통해 나타내었다. 이는 공기 중 고유진동수 f_o 와 수중 고유진동수 f_L 의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = \frac{1}{\zeta_f} \left(\frac{f_o}{f_L} - 1 \right) \quad (2)$$

상사성을 가지는 구조물의 경우 모드형상이 같기 때문에 각 모드에 대한 NAVMI 계수는 같다. 이러한 성질과 식(1)을 통해 실제모델의 수중 고유진동수를 예측할 수 있다.

$$f_{L,r} = \frac{f_{o,s}}{\kappa} \sqrt{\frac{\epsilon}{\zeta_p(1+\zeta_m\Gamma_s)}} \quad (3)$$

† 박경수; 연세대학교 기계공학과

E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 기계공학과

** 한국원자력연구원

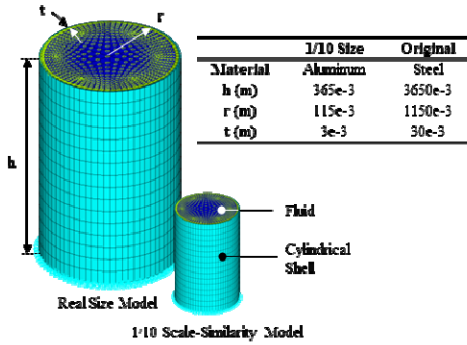


Fig.1 Cylindrical Shell Coupled with Fluid

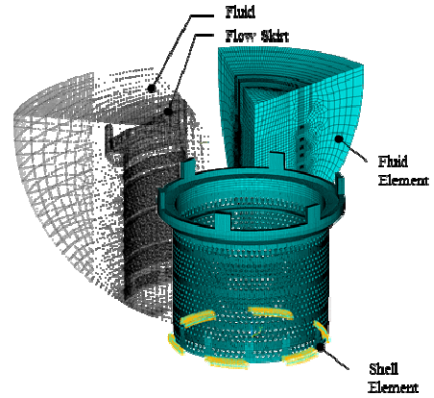


Fig.2 FEM Model of Flow Skirt

Table 1 Similarity analysis of cylindrical shell with NAVMI factor

Mode	NAVMI Factor	Real Size Cylindrical Shell in Water		
		Calculation (Hz)	FEM (Hz)	Error (%)
1	11.06	32.80	32.80	-0.01
2	9.04	34.31	34.32	-0.03
3	7.55	60.53	60.60	-0.10

Table 2 Similarity analysis of flow skirt with NAVMI factor

Mode	NAVMI Factor	Real Size Flow Skirt in Water		
		Calculation (Hz)	FEM (Hz)	Error (%)
1	1.90	76.85	76.80	0.06
2	2.52	78.63	78.80	-0.21
3	2.65	142.62	141.3	0.94

2.2 NAVMI계수를 사용한 상사성 해석의 적용

실제 원자로 내부구조물의 상사성 해석에 앞서 원통 구조물에 대해 패치 테스트를 수행하였다. 원통 구조물은 내부가 유체로 가득 차 있으며 밀면이 고정되어 있다. 상사성을 확인 하기 위해 실제 크기의 원통 구조물과 형태만 동일한 1/10 크기의 축소 모델에 대한 해석을 수행하였다. 축소 모델과 실제 모델의 기하 정보와 유한요소모델은 Fig.1에 나타나 있다. 상사성 해석의 순서는 다음과 같다.

- 1) 유한요소해석을 통해 축소 모델의 공기 중 및 수중 고유진동수를 추출한다.
- 2) 추출된 고유진동수를 통해 각 모드에 대한 NAVMI계수를 계산한다.
- 3) 축소 모델과 실제 모델의 물성치 및 척도를 통해 보정계수를 추출한다.
- 4) 위의 과정으로부터 계산한 NAVMI계수 및 보정계수를 통해 실제 모델의 공기 중 및 수중 고유진동수를 계산한다.
- 5) 계산된 실제 모델의 고유진동수와 유한요소해석을 통해 추출된 실제 모델의 고유진동수를 비교한다.

계산 결과와 유한요소해석 결과는 Table 1에 정리되어 있다. 두 결과의 비교를 통해 계산 결과와

해석 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있었고, 따라서 NAVMI계수를 사용한 상사성 해석이 유효하다는 것을 확인하였다.

패치 테스트에 이어 실제 원자로 내부구조물 중 하나인 유동분배통에 대한 상사성 해석을 수행하였다. 유동분배통의 유한요소모델은 Fig. 2에 나타나 있다. 상사성 해석은 패치 테스트와 동일한 순서로 진행하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

3. 결론

본 연구에서는 구조물이 유체와 연성되어 있을 경우 상사성을 통한 고유진동수 예측 방법에 대해 소개하였다. 이를 통해 실제 원자로 내부구조물의 고유진동수를 계산하였으며 유한요소해석결과와의 비교를 통해 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 해석 결과 유체-구조 연성해석에서 상사성을 이용한 예측 방법이 유효함을 확인하였고 이를 통해 다른 원자로 내부구조물에도 적용할 수 있을 것으로 보인다.

참고 문헌

- (1) M. K. Kwak and K. C. Kim , 1991, "Axisymmetric Vibration of Circular Plates in Contact with Fluid," Journal of Sound and Vibration, 146(3), pp. 381-389