

축소모형을 이용한 APR1400 원자로 내부구조물의 동특성 예측 Dynamic characteristics prediction of APR1400 reactor internals with using scale-down model

이상정* · 최영인* · 박종범* · 박영필* · 박노철† ·
김진성** · 노우진**

Sang-Jeong Lee, Young-In Choi, Jong-Beom Park, Young-Pil Park, No-Cheol Park,
Kyoung-Su Park, Jin-Sung Kim, Woo-Jin Roh

1. 서 론

최근 세계적으로 지진발생빈도가 급격히 증가하였을 뿐만 아니라 후쿠시마 원전사고와 같이 강력한 지진에 의한 피해 사례가 발생하고 있다. 그에 따라 강화된 내진설계 기술의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 이런 추세에 따라 높은 안전성을 가진 원자로를 설계하기 위해서는 원자로에 대한 정확한 동특성 규명이 필수적이다.

원자로의 내부 구조물들이 냉각제인 물과 접촉되어 있어 복잡한 거동을 나타내며, 대형접수구조물인 원자로를 실험하기가 힘들어 동특성을 규명하기 위해서 유한요소해석에 의존해 왔던 것이 현실이다.

따라서 본 연구는 현재 건설 중이며, 주력 수출 모델인 APR1400 경수로 원자로의 내부구조물과 내부유체간의 유체-구조 연성에 따른 정확한 동특성을 예측해보고자 축소 모형을 이용한 실험과 유한요소해석을 수행하고 결과를 상사성 이론에 적용하여 실제 원자로의 동특성을 예측하였다.

2. 실험 및 해석

2.1 축소모형 실험

본 연구에서 실제 원자로를 1/10로 축소 시킨 모형을 알루미늄 재질로 제작하였다. 내부 구조물은 노심지지배럴, 상부안내구조물, 내부배럴집합체로 대상을 한정하여 제작하고, 외부 구조물로는 원자로

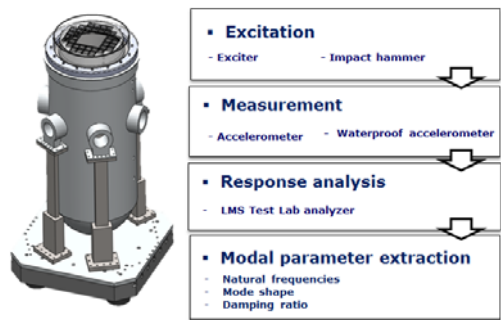


Fig 1 Experimental setup

용기 및 지지대를 제작하였다. 충분한 동특성 확인을 위해 원주 방향으로 16개, 축 방향으로 8개의 측정점을 지정하여 각 구조물 마다 총 128개의 측정점을 선정하였다. 내부 유체를 모사하기 위해 조립된 원자로에 물을 채워 방수한 뒤 스탑거와 가진기를 사용하여 구조물을 가진하고, 측정점에 방수 가속도 센서를 부착하여, 응답을 얻었으며, LMS Test Lab 분석기를 통해 동특성 데이터를 얻었다.

2.2 유한요소해석

유한 요소 해석 모델은 Fig 2와 같이 내부구조물과 내부유체를 연성하여 구축하였다. 해석 프로그램은 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 15ver를 사용하였다. 구조물 요소는 ANSYS가 제공하는 Solid45요소를 사용하였고, 구조물과 접하는 유체는 Fluid30로 모델링 하였으며, 구조물간 경계 조건은 절점 공유 통하여 구현하였다.

2.3 결과

실험과 유한 요소해석의 결과는 Table 1에 도시한 것과 같다. 반복적인 실험과 경계 조건 및 물성

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

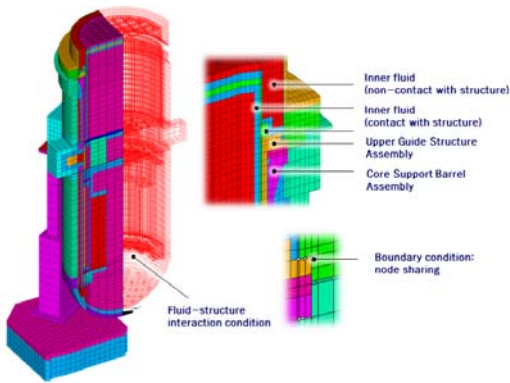


Fig 2 Finite Element Model

치 조정 그리고 중요한 유체-구조 연성 효과를 반영하여, 오차가 4~7% 이내로 고유진동수와 모드형상을 도출하였다. 또한 공기중과 비교 했을 때, 1차 모드인 축 방향 굽힘 모드는 67%, 2차 모드인 셸 모드는 83%, 3차 모드인 셸 모드 79%의 부가 질량 효과로 인한 고유진동수 감소 효과를 갖는 것을 확인하였다.

2.4 상사성 해석

상사성 해석은 이전 연구된 논문을 참고하여 이루어졌고^{(1),(2)} 이를 통하여 실제 크기 원자로의 동특성을 계산해 냈다. 상사성 해석을 적용한 계산과 축소 모형을 기초로 한 실제 크기의 유한요소해석 결과를 비교한 것을 Table 2에 도시하였다. 1차 모드는 50%, 2차 모드는 35.7%, 3차 모드는 73.7%의 부가 질량 효과로 인한 고유진동수 감소 효과를 갖는 것을 확인하였고, 유한요소해석과 상사성 해석간의 오차가 3% 이내로 상사성 해석의 유효성 확인하였다.

Table 1 Result of FEA and Experiments in water

Mode (n,m)	Natural frequency (Hz)		Error
	Modal test	FEA	
CSB(1,1) UGS(1,1) OOP	53	50	5.7%
CSB(1,1) UGS(1,1) IP	70	67	4.3%
CSB(3,2) UGS(3,1) OOP	108	102	5.6%

*OOP: Out-of-phase

*IP: In-phase

*n: Circumstantial node number

*m: Axial node number

*CSB: Core Support Barrel *UGS: Upper Guide Structure

Table 2 Result of scale similarity and real scale FEA

Mode Shape (n, m)	Natural Frequencies[Hz]			
	Air	Water (Reactor Coolant)		
		FEM	Calculation	Error [%]
(1,1) OOP	15.8	7.9	7.8	1.3
(1, 1) IP	15.8	10.0	9.7	3.0
(2, 1)	44.6	11.7	11.8	-0.9

*n: Circumstantial node number

*m: Axial node number

$$* Error = \frac{FEM - Calculation}{FEM} \times 100 (\%)$$

3. 결론

축소모형 실험과 유한요소해석을 바탕으로 상사성 해석을 적용한 결과, 실제 크기 원자로의 주된 모드인 내부구조물들의 역위상 굽힘 모드가 7.8Hz로 예측되며, 이는 실험에 근간한 축소모형 유한요소해석을 실제 크기로 적용했을 경우와 오차가 매우 작음을 확인하여, 상사적 적용이 유효성을 검증하였다. 본 연구에서 축소모형을 기반으로 상사성을 적용한 해석 결과를 바탕으로 추후에 이어지는 APR-1400 원자로의 내진 해석을 진행하게 될 것이다.

참고문헌

- [1] Seungho Lim et al. "Dynamic characteristics of a perforated cylindrical shell for flow distribution in SMART" Nuclear Engineering and Design, Volume 241, Issue 10, October 2011, Pages 4079-4088
- [2] Youngin Choi et al. "Dynamic characteristics identification of reactor internals in SMART considering fluid- structure interaction" Nuclear Engineering and Design, Volume 255, February 2013, Pages 202-211

후 기

본 연구는 한국원자력안전기술원의 지원을 받아 이루어졌으며 관계자 여러분들께 감사 드립니다.