

원자로 내부구조물 동특성 확인을 위한 축소모형 설계

Design of Scale-down Model for Dynamic Characteristics Identification of Reactor Internals

최영인* · 박영필* · 박노철* · 박경수† · He Rongkai** · 구자춘**

김진성*** · 박찬일***

Youngin Choi, Young-Pil Park, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park, He Rongkai,
Ja-Choon Koo, Jinsung Kim, Chanil Park

1. 서 론

원자로의 동특성해석은 내/외부에서 발생하는 다양한 진동으로부터 원자로의 안전성을 검증하는 중요한 과정이다. 특히 지진응답은 원자로에 큰 피해를 입힐 수 있고 막대한 금전적, 인명적 손실을 유발하기 때문에 구조 건전성 평가에 있어서 중요시되고 있다. 구조물의 고유진동수, 모드형상과 같은 동특성은 이러한 지진응답이 가해졌을 때 구조물이 어떠한 응답을 보이는지 알 수 있는 구조물의 고유한 특성이다. 이에 지진해석에는 구조물의 동특성을 파악하는 작업이 선행되어야 한다.

구조물의 동특성은 구조물의 수치해석모형을 작성하고 이에 대한 운동방정식을 계산함으로써 추출될 수 있다. 가장 널리 사용되는 수치해석 방법으로는 유한요소해석이 있으며 이는 컴퓨터를 통해 다양한 상용화된 프로그램을 이용하여 수행할 수 있다. 하지만 아무리 구조물의 상세한 형상과 이를 둘러싼 유체를 정교하게 표현한다 해도 그 결과는 시험결과가 뒷받침 되지 않는 이상 타당성을 얻기 어렵다. 동특성시험의 경우 실제 원자로의 정확한 동특성을 구할 수 있지만 시험을 위한 모델을 제작하는 것은 매우 큰 비용이 필요하고 시험결과를 측정하는 것 또한 매우 어려운 일이다. 이에 본 논문에서는 동특성시험을 위해 실제 원자로의 형상을 모사한 축소모형을 설계하는 방법을 소개하고 이를 현재 상용화된 한국형 원자로 APR1400에 적용시켜 보았다.

2. 축소모형을 이용한 동특성해석

2.1 목적

원자로와 같은 대형 구조물은 실제 구조물을 이용해 시험하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 수치해석 방법으로 그 동특성을 예측하게 된다. 하지만 그 결과의 타당성을 얻기 위해서는 시험 결과와의 비교가 필요하다. 원자로의 크기를 크게 줄인 축소모형의 경우에는 제작이 용이하여 비용이 크게 감소되며 적은 인력으로도 시험이 가능하고 명확한 시험결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 제작된 축소모형은 구조물 각각에서부터 전체 조립된 상태까지 단계적으로 시험이 수행되며 이는 유한요소해석 결과와 비교하여 유한요소모델의 타당성을 검증할 수 있다. 최종적으로 타당성이 입증된 축소모형의 유한요소모델은 상사성 보정을 통해 실제 원자로의 동특성을 예측하는데 활용된다.

2.2 축소모형의 설계

축소모형의 설계는 그림 1과 같은 과정을 통해 진행된다. 축소모형의 축소비의 경우 시험환경과 제작 방법, 내부 센서의 부착 공간 등을 고려하여 결정 된다. 실제 원자로의 경우 구조물 대부분은 304 Stainless steel로 가공되지만 축소모형은 무게, 부식방지, 가공성 등을 생각하여 시험에 용이한 재료를 선정하여 제작한다. 이와 같이 실제와 다른 크기 및 재질은 추후 유한요소해석이나 상사성해석을 통해 보정이 가능하다. 축소모형의 축소비 및 재질을 결정한 후에는 구조물 제작에서 불필요한 부분에 대해 형상 단순화가 이루어진다. 이는 주요 구조물의 동특성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 이루어지며 예비 유한요소해석을 통해 검증이 이루어진

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



Fig.1 Procedure of Scale-down Model Design

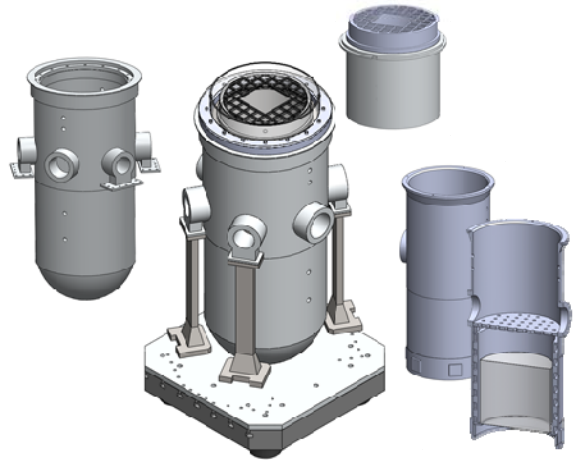


Fig.2 Scale-down Model of Reactor Vessel Internals of APR1400

다. 축소모형 각 구조물간의 결합조건은 실제 원자로 내부구조물의 결합조건을 최대한 반영하여 설계함으로써 신뢰성 있는 경계조건을 형성하도록 한다. 마지막으로 동특성시험을 위한 구조변경이 필요하며 이는 센서 부착 공간, 수중시험을 위한 배수 및 급수, 방수처리 등을 고려하여 이루어진다.

2.3 APR1400 원자로용기 집합체 축소모형

본 연구에서는 2.2절에서 설명한 축소모형 설계 방법을 현재 상용화된 한국형 원자로 APR1400에 적용하여 APR1400 원자로용기 및 내부구조물의 축소모형을 설계하였다. 그 중에서도 노심지지배럴 집합체, 상부안내구조물 집합체와 같이 1차 고유진동수가 지진의 영향 범위 내인 수~수십 Hz 이내에 있는 구조물들을 중심으로 축소모형을 설계하였으며 유동분배통이나 노즐과 같이 고유진동수가 높고 주요 구조물들과 결합되어 있지 않은 구조물들의 경우는 해석에서 제외하였다. 또한 주요 구조물들과 연성되어 동특성에 큰 영향을 미치는 원자로용기 내부의 수많은 튜브들과 핵연료집합체의 경우에는 그 형상 그대로 제작하지 않고 등가 질량을 가진 단순 구조물로 표현하여 전체 질량만을 고려해 주었다. 구조물의 형상 단순화는 추후 제작과 유한요소해석의 편이를 고려하여 이루어졌다. 예를 들어 내부배럴집합체의 상단 플레이트, 상부안내구조물 배럴 하부 플레이트, 핵연료정렬판과 같이 형상이 복잡한 패턴을 가지는 경우 제작이 쉽게 단순한 형상으로 대체 되었으며 이는 예비 유한요소해석을 통해 그 결과가 저차 모드의 동특성에 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 원자로의 지진해석에 앞서 내부구조물의 동특성 확인을 위한 축소모형의 설계 방법을 소개하였으며 이를 실제 상용 원자로인 APR1400에 적용시켜 보았다. 설계된 APR1400 원자로용기 및 내부구조물의 축소모형은 그림2에 나타나 있다. 제작된 축소모형은 동특성시험과 유한요소해석을 통해 원자로 내부구조물의 동특성 확인에 이용되며 이로부터 타당성이 검증된 구조물들의 동특성은 추후 지진해석모델 구축에 활용될 예정이다.

후 기

본 논문은 한국원자력안전기술원의 지원을 받아 연세대학교 기계공학과와 성균관대학교 기계공학과 의 공동 연구로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Lim, S., Choi, Y., Ha, K., Park, K.S., Park, N.C., Park, Y.P., Jeong, K.H. and Park, J.S., 2011. Dynamic characteristics of a perforated cylindrical shell for flow distribution in SMART. Nucl. Eng. Des. 241(10), 4079-4088
- (2) 김규형, 고도영, 김성환, 2011, “원자로냉각재펌프 맥동에 대한 APR1400 원자로내부구조물의 진동 및 응력 해석”, 한국소음진동공학회 2011년 추계학술대회논문집, pp.221-226