



SMART를 통한 원자력계통의 구조건전성 확보 기술

박노철*, 박경수

(연세대학교)

1. 머리말

현재 우리나라에서 개발 중인 SMART(system-integrated modular advanced reactor)는 한국원자력 연구원이 지난 1997년부터 개발해온 우리 고유의 차세대 원자로이다. SMART는 그림 1과 같이 일체형 원자로로써 노심, 증기발생기, 냉각재펌프, 가압기 등 주요기기를 하나의 원자로용기 안에 설치하였다. SMART의 가장 큰 특징 중 하나는 기존 원자로에 비해 안전성을 크게 향상시켰다는 점이다. 대표적으로 주요 기기 사이의 배관을 제거함으로써 배관 파단사고 발생 배제, 다량의 원자로 냉각재 확보, 피동잔열제거계통 설치 등이 있고 기존의 대형 발전이 아닌 소규모 발전이라는 점에서 위험의 분산효과를 기대할 수 있다. 또 다른 SMART의 장점은 기존 대형 원전과는 달리 전력생산과 동시에 하루 4만 톤의 해수를 담수화 할 수 있다는 특징을 가지고 있어 물 부족이 심한 소형 도시 및 크루즈 선박에 전기와 물을 제공할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

최근 들어 후쿠시마 지진, 국내 원전 정지 사고 등이 발생함에 따라 사람들의 인식 속에는 원자로에 대한 불안감을 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 원자로 제작에 앞서 다양한 성능 및 안전성 입증을 위한 검증시험이 수행되어지고 있다. 그 중 하나가 원자로의 구조건전성 검

증으로 이는 외부 지진하중이나 내부 유동으로 인해 발생하는 진동에 의한 구조 안전성을 예측하고 이에 대한 설계 여유를 확보하는 것이다. 이를 위해서는 내부 냉각재로 인한 유체-구조 연성 효과를 고려하여 원자로내부구조물의 동특성을 정확히 파악하는 과정이 필요하다. 이 글에서는 원자로내부구조물의 축소모형을 통해 시험 및 해석을 수행함으로써 기존 연구보다 신뢰성을 크게 향상시킨 해석 기술을 소개하고자 한다.

2. 구조건전성 해석 기술 현황

기존 원자로의 구조건전성 해석에 관한 연구들은 국내외에서 활발히 이루어져 왔다. 원자로와 같은 대형구조물의 경우 직접 시험이 어렵기 때문에 전산코드 프로그램을 이용한 수치해석 방법을 주로 사용하고 있다. 과거 국내외에서 이뤄진 연구들로 보면 복잡한 원자로내부구조를 크게 단순화시켜 해석을 수행해왔다. 이는 유한요소해석의 경우 요소(element)수 증가에 따라 해석 시간 및 비용이 크게 증가하기 때문이다. 최근 들어서야 해석의 정확성을 높이고 보수성을 감소시키기 위해 구조물을 3-D 상세 유한요소모델로 구축하고 있는 실정이지만 이러한 유한요소해석을 통한 해석평가방법 및 결과의 타당성을 확인하기 위해서는 실제 원자로에 대한 시험

* E-mail : pnch@yonsei.ac.kr / Tel : (02) 2123-4530

결과가 뒷받침되어야 한다. 그러나 실제 원전에 대한 동특성 시험 및 지진시험 등은 불가능하기 때문에 이에 대한 실제적 검증은 어려운 실정이었다.

3. 축소모형을 사용한 해석 기술

앞서 언급한 것처럼 실제 원자로의 시험은 현실적으로 불가능하기 때문에 실제 원자로내부 구조물의 동특성을 파악하기 위해서는 이를 축소 모사하여 동특성 시험을 수행하는 방법이 최근 제안되었다. 동특성 시험을 위해서는 우선 원자로내부구조물의 축소모형을 설계할 필요성이 있다. 축소모형의 설계 시 가장 유의해야 할 점은 축소비, 축소모형의 재질, 형상 단순화 정도, 해석 범위 설정 등이 있다. 축소모형은 실제 원자로 내부구조물의 형상을 최대한 유사하게 모사하여 이루어진다. 하지만 실제 형상을 그대로 모사하는 것은 불필요하기 때문에 동특성에 크게 변화를 주지 않는 범위 내에서 단순화가 이루어지며 주요 해석대상이 아닌 불필요한 구조물들은 해석에서 제외한다. 축소모형의 축소비나 재질은 시험 환경이나 비용 및 가공 용이성 등을 고려하여 결정하게 된다. 또한 각 구조물이 접하는 경

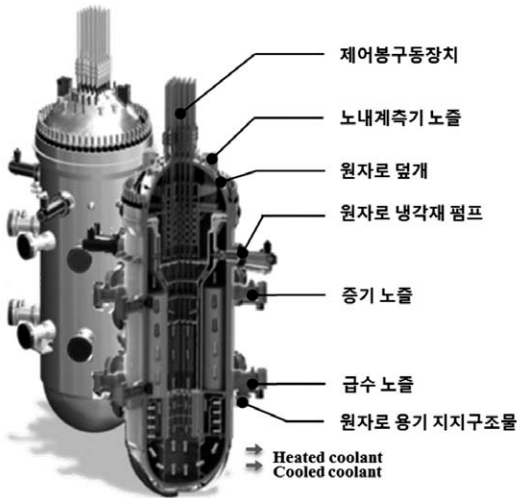


그림 1 SMART 내부구조물 개념도



그림 2 동특성 시험을 위한 SMART 축소모형

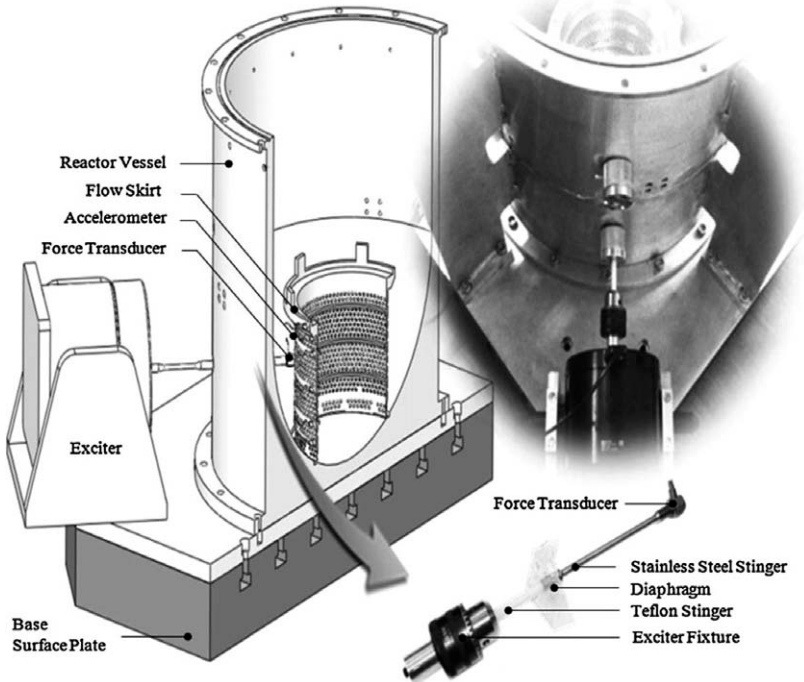


그림 3 SMART 동특성 확인을 위한 시험 환경

계조조건은 실제 원전과 가장 유사한 특성을 갖도록 설계·제작한다. 이렇게 제작된 축소모형으로부터 공기 증과 물이 채워진 상태에 대한 동특성 시험을 수행하여 고유진동수, 모드 형상, 감쇠비 등의 동특성을 추출하게 된다. 그림 2는 SMART의 동특성 시험을 위해 제작된 축소모형을 보여준다. 주요 해석 대상물인 상부안대구조물과 노심지지배럴은 실제 형상을 거의 유사하게 모사하였으며 가공성, 운반성 등을 고려하여 알루미늄을 이용하여 제작되었다. 노심이나 증기발생기의 경우에는 구조가 너무 복잡하고 고유진동수가 높아 해석 범위에서 제외되기 때문에 형상을 크게 단순화하여 제작하였다. 또한 각각의 구멍들은 유체의 부가수질량 특성과 가공성을 고려하여 설계·제작되었다.

그림 3은 이렇게 제작된 축소모형을 이용한 동특성 시험환경을 보여준다. 가진 장치로는 자유단 조건에서는 임팩트해머로 충격을 전달하였으며 원자로내부구조물을 원자로 용기에 조립

했을 경우에는 가진기를 통해 진동 입력을 주었다. 또한 전체 구조물의 가진을 위해서는 두 대의 가진기를 이용한 다중입력방식의 시험환경을 구성하였으며, 각각의 가진기의 특성은 방수 처리된 스틱거를 이용하여 구조물에 전달하였다. 구조물의 진동 응답은 부착된 다수의 가속도계를 통해 측정되었으며, 측정위치의 선전은 기 해석된 해석결과를 바탕으로 모드형상이 잘 측정되는 위치에 설치 응답을 받았으며, 측정된 응답은 프론트-엔드와 신호분석기를 통해 분석되어 고유진동수, 모드형상, 감쇠비 등을 계산하였다.

동특성 시험으로부터 추출된 시험 결과는 구축된 원자로내부구조물의 유한요소모델의 신뢰성을 확보하는데 활용된다. 원자로내부구조물의 유한요소모델은 제작된 축소모형의 기하형상, 물성치, 경계조건과 내부 냉각재로 인한 유체-구조 연성효과를 충실히 반영하여 구축한다. 그림 4는 이를 위한 동특성 해석 과정을 보여

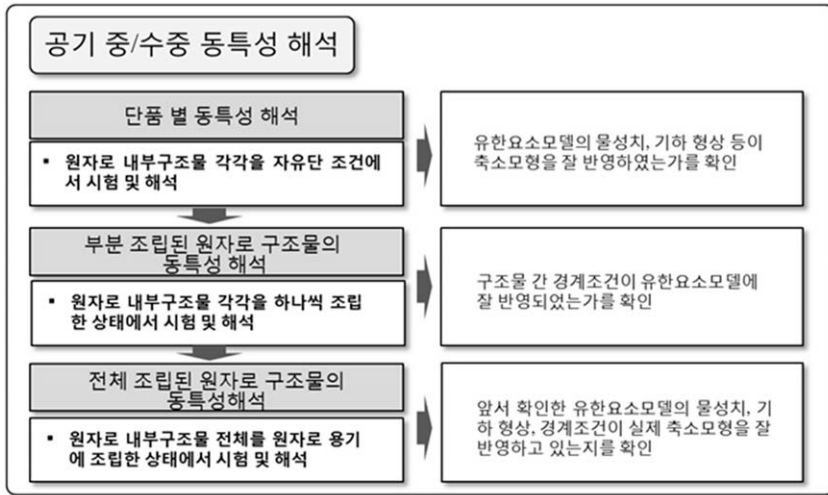


그림 4 축소모형을 이용한 동특성 해석 절차

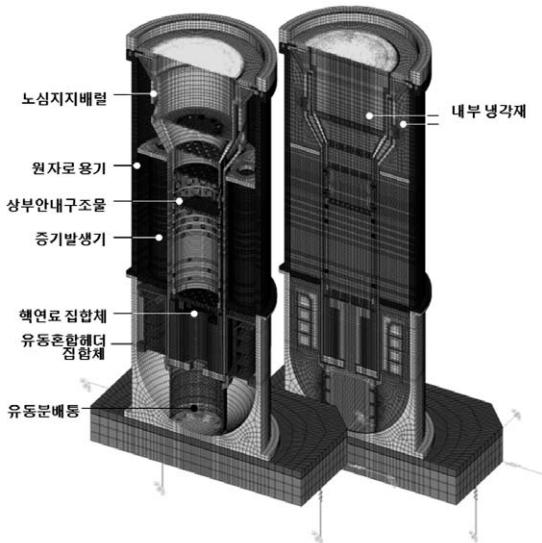


그림 5 SMART 내부구조물 유한요소모델

준다.

이러한 과정을 걸쳐 구축된 SMART 내부구조물의 유한요소모델은 그림 5와 같다. 각 구조물들은 단품 별 해석과정을 통해 기하 형상 및 물성치가 올바르게 지정되었는지를 확인하였다. 구조물 간의 체결 조건은 부분 조립 해석과정을 시험 결과와 일치하도록 지정되었다. 최종적으로 모든 구조물과 내부 냉각재를 포함한 유한요소

모델을 구축함으로써 시험 결과와 비교하고 이에 대한 결과가 잘 일치함을 확인함으로써 구축된 유한요소모델의 신뢰성을 검증하였다. 이는 기존에 진행되어 온 해석기반의 모델보다 그 신뢰성이 크게 향상되었다고 할 수 있다.

4. 상사성 해석

축소모형은 실제 원자로내부구조물과 형상은 유사하지만 축소비, 재질이 다르다. 따라서 실제 원자로내부구조물의 동특성을 예측하기 위해서는 이를 보정해 줄 필요가 있다. 그림 6은 이를 위한 상사성 해석과정을 보여준다. 각 과정에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

4.1 NAVMI 계수 계산

NAVMI(non-dimensional added virtual mass incremental factor)계수는 유체의 부가질량 효과가 고유진동수에 미치는 영향을 나타내는 것으로 부가 질량 효과를 계수화 시킨 것이다. NAVMI 계수는 공기 중 고유진동수와 수중 고유진동수의 관계로부터 계산이 가능하며 축소 모형의 동특성 해석 결과로부터 추출할 수 있다. NAVMI 계수의 특징은 모드 형상, 경계 조건

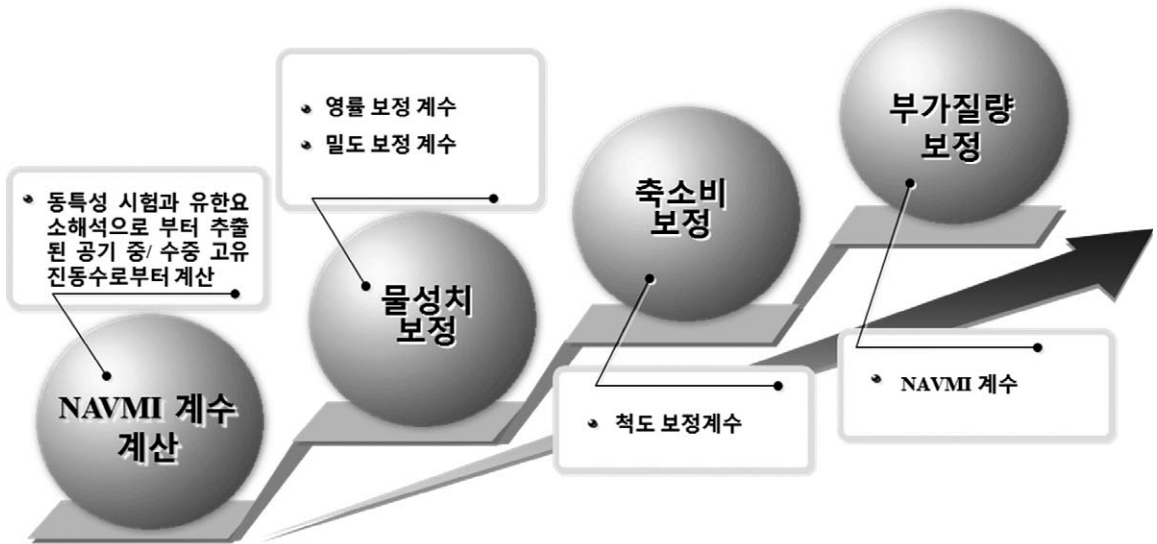


그림 6 상사성 해석 과정

에 따라 변화하기 때문에 각 모드 별로 계산해야 한다.

4.2 물성치 보정

축소모형과 실제 원자로내부구조물의 재질 차이는 영률과 밀도를 보정해 줌으로써 보정해 줄 수 있다. 영률 보정계수와 밀도 보정계수는 축소모형과 실제 원자로내부구조물의 물성치 값의 비를 나타낸다.

4.3 축소비 보정

공기 중에서 구조물의 고유진동수는 축소비에 반비례한다. 이를 계수로 나타낸 것이 척도계수이다. 앞서 계산한 물성치 보정계수와 척도계수를 사용하면 축소모형의 공기 중 고유진동수로부터 실제 구조물의 공기 중 고유진동수를 간단한 수식에 의해서 계산할 수 있다.

4.4 부가질량 보정

앞서 과정에서는 각 모드 별 NAVMI 계수와 실제 원자로내부구조물의 공기 중 고유진동수를 계산하였다. 모드 형상과 경계조건이 같은 구조

물들은 NAVMI 계수도 동일하다는 성질을 이용하여 간단한 수식을 통해 실제 원자로내부구조물의 수중 고유진동수 계산이 가능하다.

위의 과정을 걸쳐 축소모형의 고유진동수로부터 실제 원자로내부구조물의 수중 고유진동수를 계산하는 것이 가능하다.

5. 맺음말

축소모형의 동특성 시험을 이용한 구조 건전성 확보 기술은 기존 기술보다 높은 신뢰성을 확보함으로써 원자로의 안전성을 높이고 설계 여유를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 위에 설명한 상사성 해석기술을 활용할 경우 유한요소해석을 거치지 않고 축소모형의 시험 결과로부터 실제 원자로내부구조물의 고유진동수를 예측함으로써 불필요한 해석과정을 줄일 수 있다. 이는 추후 개발될 원자로들의 구조 건전성 평가에 활용될 수 있으며 원자로 이외에도 다양한 대형 접수 구조물을 해석하는데 사용될 수 있을 것으로 보인다. **KSNVE**