



원자로 내부구조물의 유체-구조물 연성 문제

정경훈*, 조상순 / 임승호, 최영인

(한국원자력연구원/연세대학교)

1. 머리말

지금까지 유체-구조물이 연성된 진동문제에 대한 수많은 연구가 이루어져 왔다. 접수된 구조물에 대한 모드시험이 제한적으로 이루어지고 있지만 구조물에 미치는 유체의 영향은 구조물의 기하학적 형상과 유체의 접수형태, 그리고 구조물 및 유체의 경계조건에 따라 달라질 수 있기 때문에 복잡한 구조물에 적용하기가 쉽지 않다. 또한 접수구조물에 대한 이론적인 접근방법들이 제시되어 있었지만 원판, 사각판, 원통형 셀 등과 같은 매우 단순한 접수 구조물에 대한 해가 제시되어 있을 뿐이다. 따라서 여러 개의 복합 구조물이 유체로 연성된 원자로 내부구조물과 같은 형상에 이론적인 해석을 시도하거나 기존에 수행되었던 모드시험의 결과를 적용하기가 쉽지 않다.

원자로 내부구조물과 같이 냉각재인 물과 접하는 구조물이 물이 구조물에 연성되어 나타나는 영향으로 동적 특성이 변하게 된다. 즉 공기중에서 갖는 원자로 내부구조물의 고유진동수가 냉각재인 물로 말미암아 현저하게 감소되는 현상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 현상을 고려한 원자로 내부구조물의 동적 응답해석이 이루어지는 과정과 동적 응답해석에서 유체-구조물 연성 문제를 어떻게 해석에서 반영하고 있는지, 그리고 축소모형을 적용한 모드시험 및 유한요소 해

석에서 얻은 결과를 통해서 유체-구조물 연성문제를 확인하는 과정을 기술하고자 한다.

2. 상용원전 원자로 내부구조물의 동적 해석

모든 구조물은 그 형상과 구성 재료 및 지지형태에 따라 고유한 진동특성을 갖는다. 구조물이 선형거동을 한다고 가정할 때 구조물의 진동특성은 고유진동수와 진동모드로 대표되며 이러한 진동특성을 간략하게 동특성이라고 한다. 구조물의 동특성은 구조물이 실제 운전중에 받게 되는 다양한 동적 하중에 대해 어떠한 응답거동을 보일지 예측하는데 중요한 기초자료가 된다. 원자력분야에서는 지진하중, 냉각재 유동하중, 배관파단 하중 등이 구조물의 건전성에 중요한 영향을 주는 대표적인 동적 하중이다. 이들 하중에 대해 구조물의 건전성 및 안정성을 확보하기 위해서는 설계과정부터 구조물의 동적 특성을 고려한 대응설계가 필요하다. 구조물의 동특성은 모드시험 혹은 모드해석을 통해 구할 수 있다. 모드시험은 실제 구조물을 대상으로 하며 외부에서 가하는 동적인 힘과 구조물의 응답거동을 측정하고 측정된 신호로부터 구조물의 고유진동수, 진동모드 및 감쇠값을 추출하는 과정으로 진행된다. 반면 해석을 통한 방법은 구조물의 거동을 대표할 수 있는 수학적 혹은 수치적 해석모델

* E-mail : khjeong@kaeri.re.kr / (042) 868-8792

을 만들고 이를 이용하여 구조물의 고유진동수와 진동모드를 계산하는 과정으로 진행된다.

시험적인 방법은 대상구조물의 정확한 동특성을 구하는 방법이나 시험을 위해 구조물을 별도로 제작해야 하는 어려움이 있다. 특히 원자력분야와 같이 대부분의 주요 구조물이 대형이고 제작비용이 많이 드는 경우는 모드시험을 위하여 실제 크기의 구조물을 별도로 제작하는 일은 매우 어렵다. 반면 해석을 이용하는 방법은 강력한 전산장비와 유한요소해석법에 기반을 둔 다양한 응용프로그램의 활용이 가능한 요즘에 비용면에서나 시간적인 면에서 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 물론 최적의 결과를 얻기 위해서는 시험과 해석을 병행하는 것이 효과적인 방법이다. 유한요소해석법은 구조물의 동특성을 분석하는데 널리 사용되는 수치해석법으로 구조물의 동적 특성을 해석하는데 있어서도 매우 유용한 방법이다. 유한요소해석법은 해석하고자 하는 대상 구조물을 매우 작은 단위의 단순한 요소로 분할하여 조합한 유한요소 해석 모델을 만들고 이로부터 도출되는 행렬식 형태

의 운동방정식을 컴퓨터를 이용해서 푸는 방법이다. 유한요소모델은 실제 구조물의 특성을 모사하는 일종의 수치모형이다. 그러므로 해석결과와의 적절성을 보장하기 위해서는 작성된 유한요소모델이 대상 구조물을 충분히 대표할 수 있음을 검증하는 작업이 선행되어야 한다. 특히 접수된 구조물의 경우, 공기중의 구조물을 모델링하는 경우보다 세심하게 고려되어야 하는 사항이 많을뿐더러 유체의 영역이 해석에 포함되기 때문에 공기중의 구조물의 갖는 요소수에 비해서 수십내지 수백배의 유체 요소수가 포함되기 때문에 계산시간과 계산에 필요한 기억용량 또한 급격하게 증가하게 된다.

일반 가압경수형 원전의 경우 그림 1에서 보는 바와 같이 원자로 냉각재 계통은 대형배관으로 연결된 원자로와 증기발생기, 냉각재펌프, 가압기 등으로 구성된다. 이 구조물을 대상으로 그림 1에 보인 바와 같이 동특성 해석모델을 구성하여 일차적으로 모드해석인 동특성 해석과 가상지진의 응답스펙트럼을 동특성 해석모델에 입력하여 내진해석 등을 수행한 후, 여기서 생산된 세

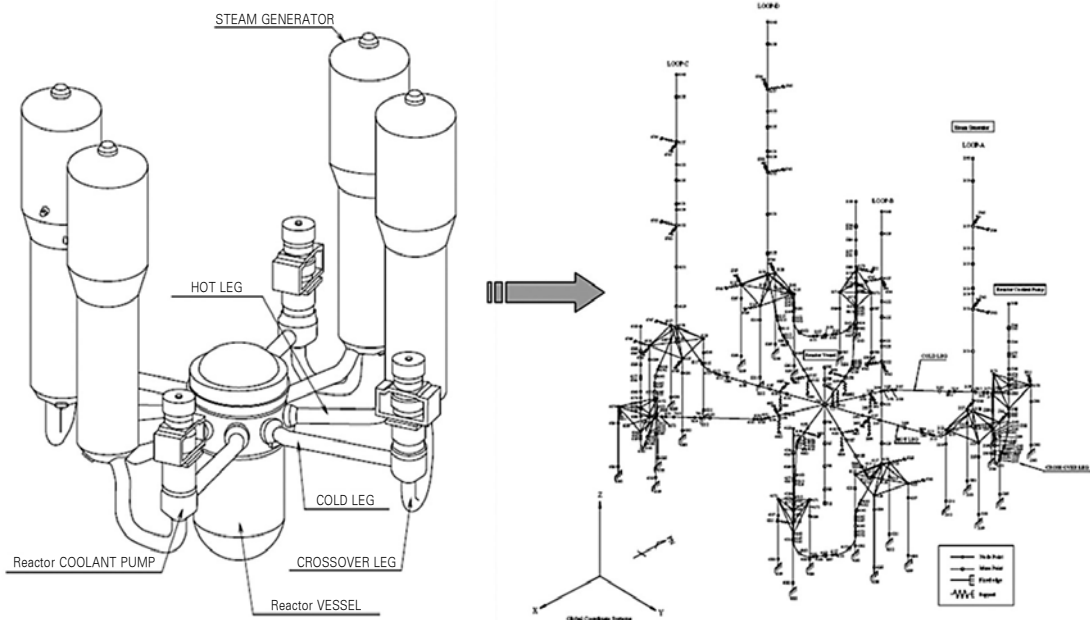


그림 1 상용원전의 원자로 냉각재 계통의 형상과 동특성 해석 모델

부 하중들을 이용하여 그림 2와 같이 상세한 원자로내부구조물과 기타 주요기기의 해석을 진행하게 된다.

일반 상용원전의 동특성 해석모델에서는 원자로 내부구조물을 포함하는 원자로 용기집합체가 단순한 보모델과 집중질량 및 강성모델 등으로 수학적으로 이상화되어 모사된다. 그러므로 단순 해석모델의 요소수와 절점수가 3차원 상세 해석모델의 요소수와 절점수에 비하여 상대적으로 작기 때문에 짧은 시간 내에 다양한 설계인자 해석을 수행할 수 있다.

원자로의 안전성을 기술하는 안전성분석보고서(safety analysis report; SAR)에는 원자로를 구성하는 각종 구조물의 해석모델과 해석시 고려된 사항을 기술하여 플랜트의 설계과정에서 안전성이 충분히 고려되었음을 기술하고 있다. 그림 2는 상용원전의 SAR에 수록된 원자로와 이와 관련된 내진해석을 위한 동특성 해석모델을 보여

주고 있으며 그림 3은 상용원전의 원자로 내부구조물의 수평 및 수직방향 내진해석을 위한 동특성 해석모델의 예를 보여주고 있다. 이 해석모델에서 집중질량의 형태로 유체의 부가질량이 반영된다.

원자로의 모델링 과정에서 중요한 문제 중 하나는 냉각재가 구조물의 동특성에 미치는 영향을 고려한 동적 해석모델을 구성하는 것이다. 원자로는 냉각재를 담고 있는 원자로용기와 원자로 내부구조물로 구성되므로 냉각재와 원자로 내부구조물의 상호작용으로 인한 동특성의 변화가 발생한다. 식 (1)은 구조물의 공기중 고유진동수 f_o 와 접수 고유진동수 f_L 사이의 관계를 나타내는 식이다.

$$f_L = \frac{f_o}{\sqrt{1 + (T_L^*/T_p^*)}} = \frac{f_o}{\sqrt{1 + \eta}} \quad (1)$$

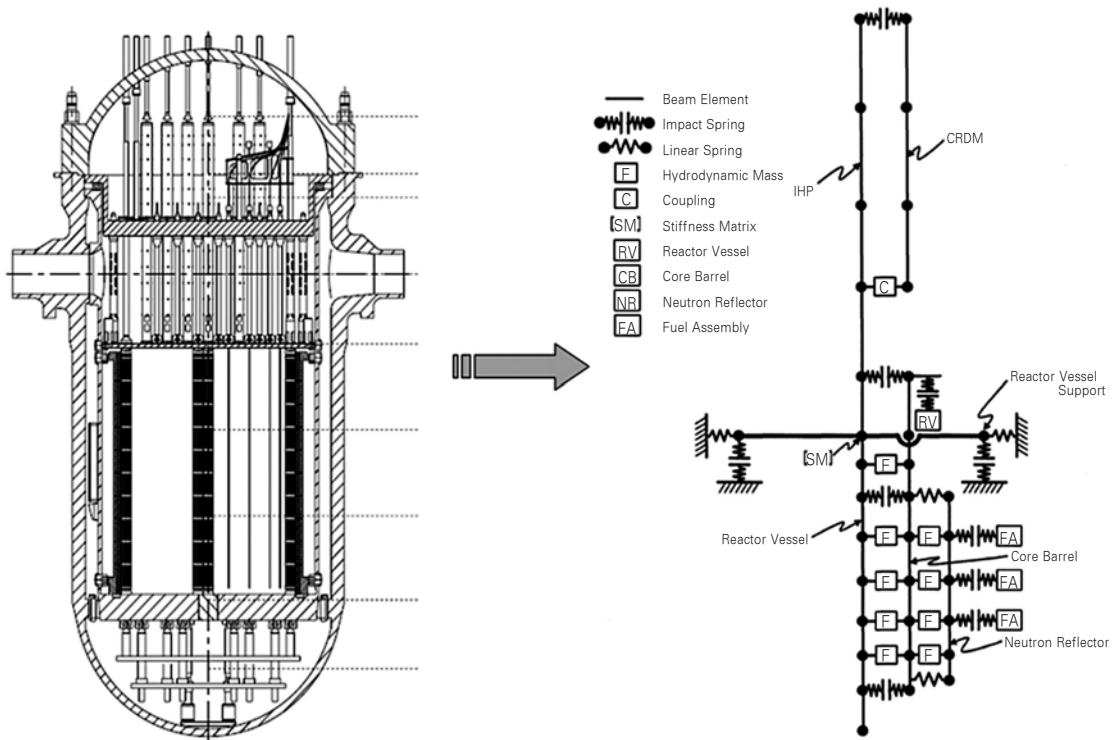


그림 2 상용원전의 원자로 집합체의 형상과 동특성 해석모델

여기서 T_L^* 은 유체의 기준 운동에너지를 나타내며, T_p^* 는 구조물의 기준운동에너지가 된다. η 는 유체의 부가질량계수(hydrodynamic added mass coefficient)가 된다. 유체는 변형에 따른 강성을 갖지 않기 때문에 운동에너지는 갖지만 포텐셜 에너지의 항은 영이 된다. 따라서 접수구조물에서 일반적으로 η 값이 항상 영보다 크게 나타나고 접수구조물의 고유진동수는 항상 공기중 고유진동수보다 낮게 나타난다. 이러한 유체-구조물 상호작용(fluid-structure interaction, FSI)을 통해서 유체에 잠겨있는 구조물이 운동하면 주위에 있는 유체가 함께 운동하며 유체의 유동에 의한 압력이 생성된다. 이 압력은 구조물의 상대가속도에 비례하고, 구조물에 유체역학적인 힘(hydrodynamic force)으로 작용하며, 유체역학적인 연성(hydrodynamic coupling)을 형성한다. 유체역학적인 연성은 구조물의 고유진동수와 모드형상뿐만 아니라 감쇠특성에도 영향을 미치며, 고유진동수에 미치는 영향은 유체부가질량(hydrodynamic added mass)의 개념으로 설명되고 있다.

3. SMART 원자로 내부구조물의 동적 해석

SMART 원자로의 설계에 있어서도 원자로계통의 내진 해석과 배관과단 해석과 같은 동적 해석 또한 동특성 해석모델을 사용한다. SMART 원자로시스템의 동특성 해석모델은 보요소와

SMART 원자로의 설계에 있어서도 원자로계통의 내진 해석과 배관과단 해석과 같은 동적 해석 또한 동특성 해석모델을 사용한다. SMART 원자로시스템의 동특성 해석모델은 보요소와

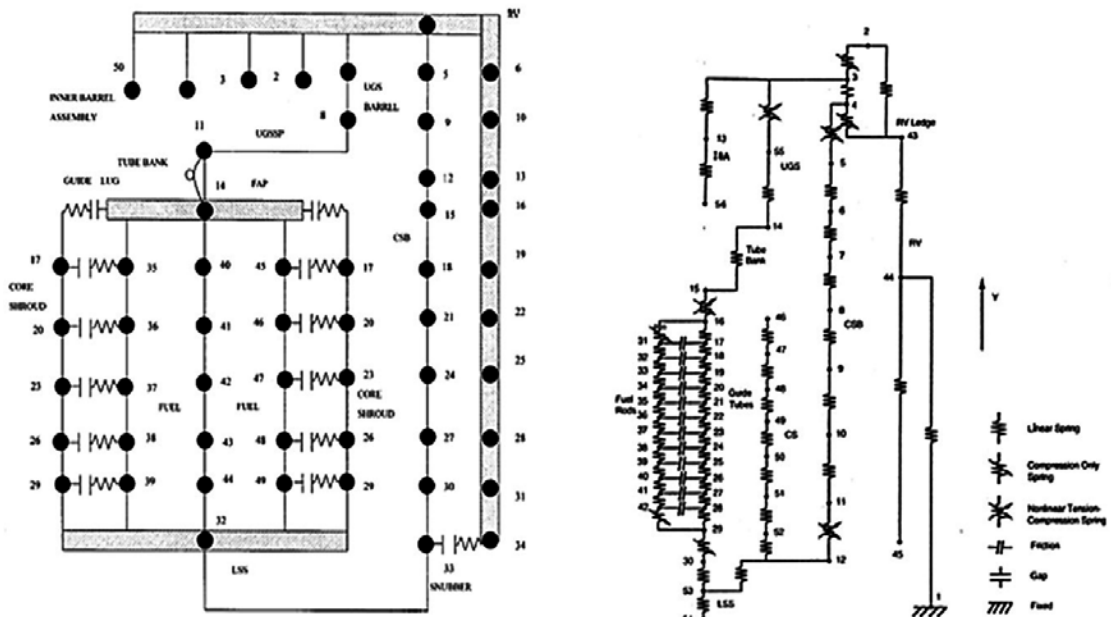


그림 3 상용원전의 원자로용기와 원자로 내부구조물의 수평 및 수직방향의 동특성 해석모델

집중질량요소로 구성된 동특성 모델이다. SMART 원자로 계통은 증기발생기와 가압기 그리고 냉각재펌프 모두가 원자로용기 내부 혹은 용기 벽에 직접 장착되어 원자로 냉각재가 통과

하는 주배관이 없는 구성을 갖는다. 그러므로 원자로시스템의 동적 해석에 있어서 원자로 냉각재 계통과 내부구조물의 해석을 위한 별개의 해석모델을 사용하는 상용원전의 경우와 달리 SMART 원자로시스템의 해석에는 원자로용기와 원자로 내부구조물로 구성된 단일한 해석모델을 이용해 동특성 해석을 수행한다. 그러나 상용원전에 비하여 원자로 내부구조물의 종류가 많고 원자로 용기 내부에 조밀하게 배치되어 있는 관계로 그림 4에 보인 바와 같이 SMART 원자로시스템의 동특성 해석모델은 상용원전의 내부구조물 해석모델에 비하여 매우 복잡하다.

그림 5는 SMART 원자로 계통의 동특성 해석모델은 원자로를 구성하는 각 원자로 내부구조물들의 개별 상세 유한요소 해석모델을 이용하여 각 원자로 내부구조물의 동특성을 파악하고 이를 기준으로 각 원자로 내부구조물을 대표하는 집중질량과 보요소로 구성된 개별 등가모델을 작성한 후 조립하여 구성하는 과정을 보여주

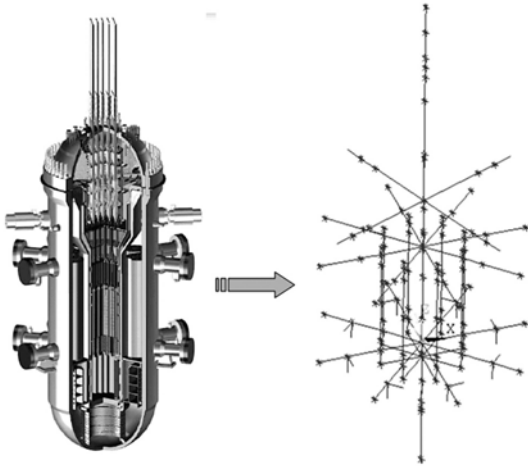
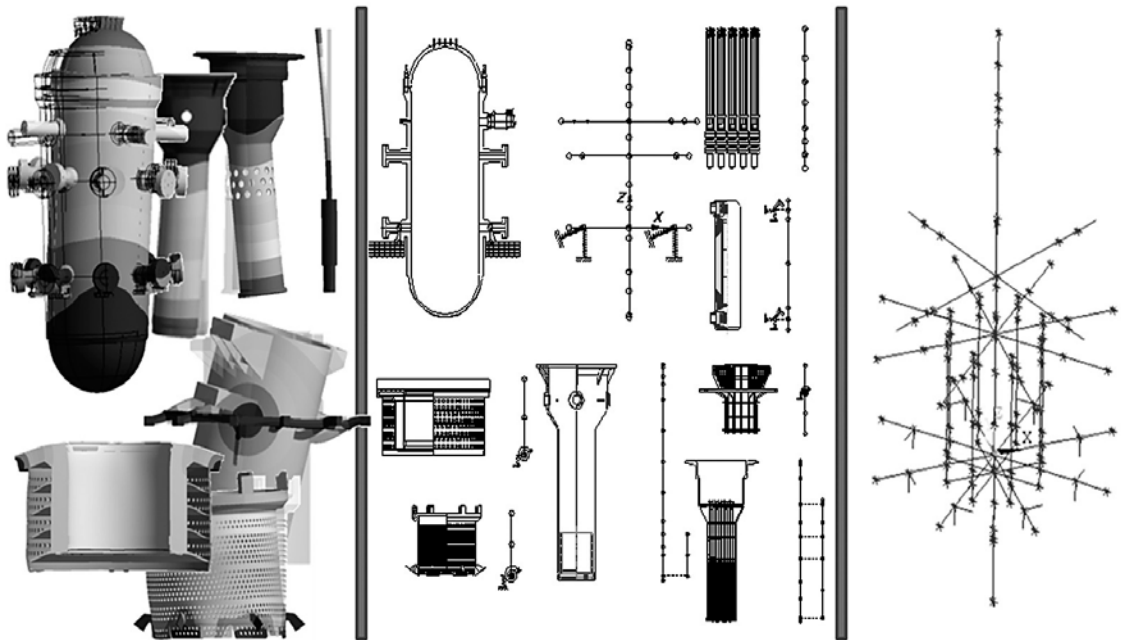


그림 4 SMART 원자로 계통과 동특성 해석모델



부품 별 3D-Solid 모델 → 부품 별 Skeleton 모델 → 전체 Skeleton 모델

그림 5 SMART 원자로 계통의 동특성 해석모델 작성 절차

고 있다. 그림 6은 SMART 원자로 내진해석에서 작성된 동특성 모델을 원자로건물 모델과 연계시켜 건물 기초에서 정의되는 지진신호를 입력으로 하여 지진응답해석을 수행하고 해석결과로 얻은 응답신호를 이용해 각 부구조물의 내진해석에 필요한 층응답스펙트럼과 주요 지점의 응답하중을 생산하는 과정을 나타내고 있다.

그림 4와 같은 등가모델의 정확도를 평가할 수 있는 기준이 되는 고유진동수 및 진동모드를 구하기 위하여 원자로 집합체의 각각의 구성요소에 대한 상세 유한요소모델인 3차원 솔리드모델을 이용하여 동특성 해석을 수행하였다. 3차원 솔리드모델을 이용하여 수행하는 원자로 집합체 구성요소 동특성의 계산과정의 타당성은 원자로집합체 축소모델을 대상으로 한 고유진동수와 모드형상의 시험결과를 비교 평가하여 수행되었다.

SMART 원자로는 그림 7과 같이 원자로용기내에 노심, 증기발생기, 가압기, 노심지지배럴집합체, 상부안내구조물집합체, 냉각재 등을 포함하

고 있으며, 원자로용기에 냉각재펌프가 부착되어 설치된다. SMART 원자로는 지진 등의 강력한 외부진동에 노출될 수 있으므로 지진하중에 대한 건전성과 원자로의 신뢰성을 확보하는 것이 반드시 필요하다. 일반적으로 원자로 집합체에 대한 신뢰성의 확보는 유한요소 해석을 통하여 수행된다. SMART 원자로 집합체의 유한요소 모델은 동적거동을 해석하는 목적과 관점에 따라 각기 다른 형태로 구성할 수 있으며, 그림 7과 같이 해석 목적에 따라 3차원 솔리드모델과 등가모델(equivalent dynamic model) 그리고 동특성모델로 구분할 수 있다. 3차원 솔리드모델은 원자로집합체의 모든 부품과 집합체를 3차원으로 모델링하여 서로 간의 연성을 포함한 상세한 동특성분석을 목적으로 한다. 반면 등가모델은 각 집합체의 동적거동에 지배적인 구조물과 연성상태를 모델링하여 집합체의 거시적 동특성분석을 하기 위하여 작성한다. 등가모델은 원자로집합체를 구성하는 각 주요 집합체를 보 요소, 집중질량 요소 및 스프링 요소로 각각 등가적으로 모델

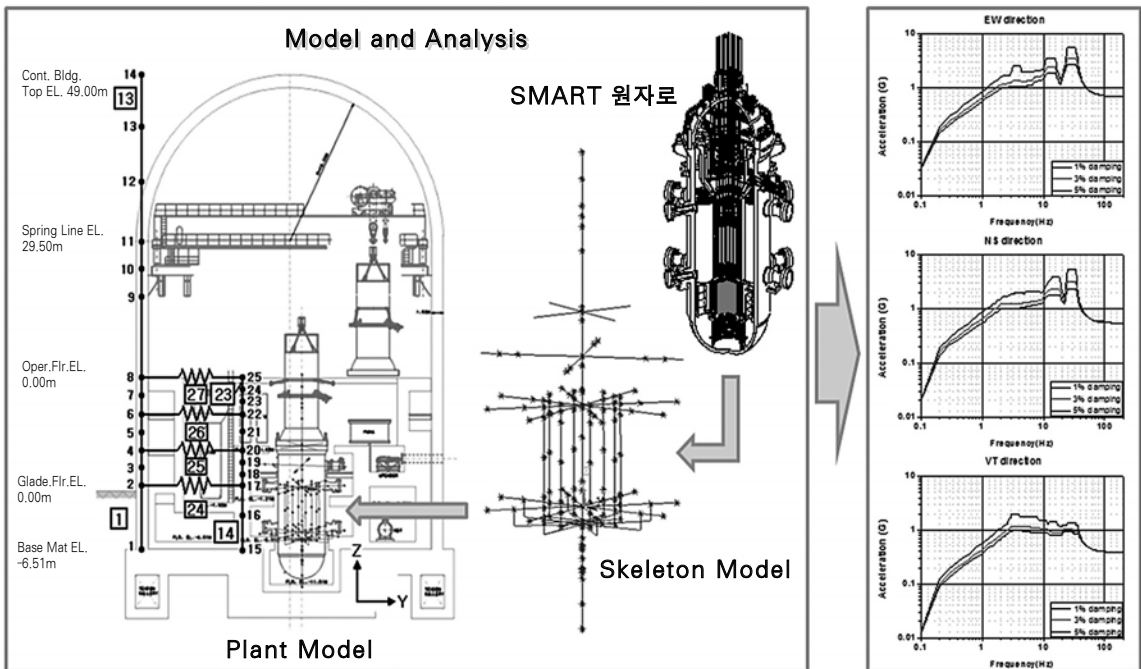
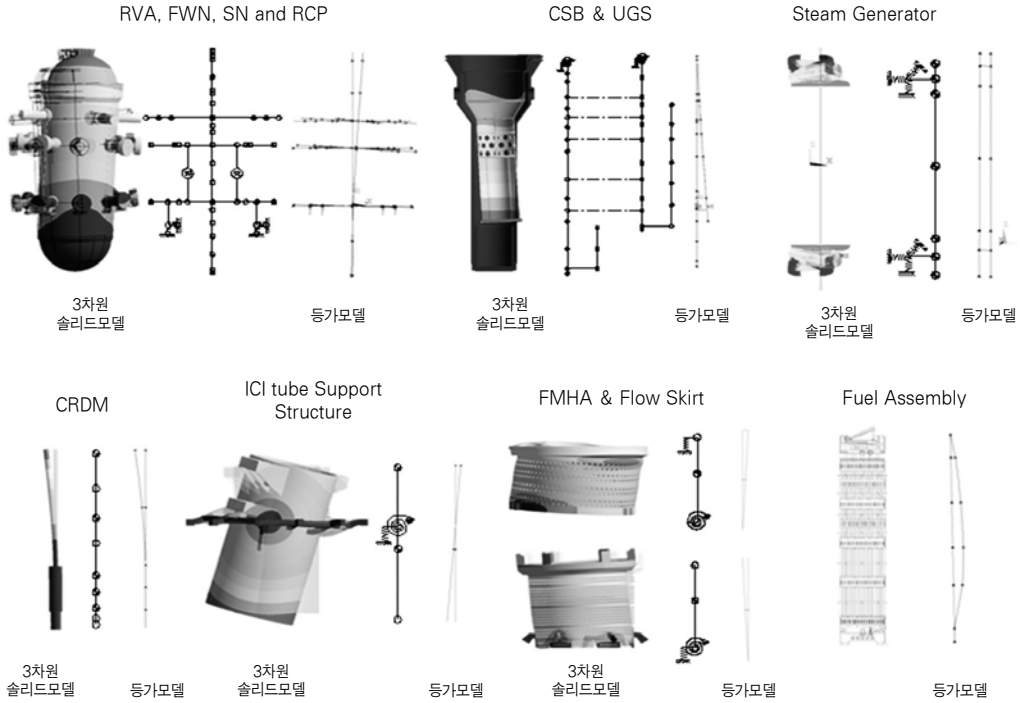


그림 6 SMART 원자로 계통 내진해석 절차 요약

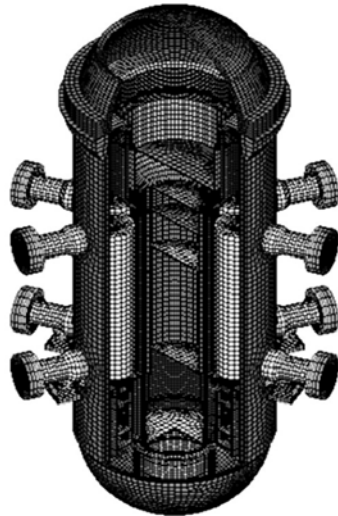


각 집합체의
유한요소모델 보정



각 집합체의 결합

SMART 원자로집합체의
3차원 솔리드모델



SMART 동특성모델

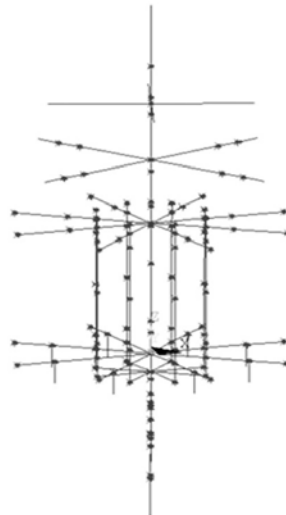


그림 7 각 집합체의 등가모델을 이용한 SMART 동특성 해석모델의 작성과정

링하였다. 그리고 원자로 집합체의 동특성을 분석하기 위하여 각각의 등가모델을 강체구속, 미끄럼구속, 스프링요소로 서로 결합하여 SMART 동특성 모델(SMART Skeleton model)을 완성하고, 유체부가질량 효과를 고려하기 위하여 유체부가질량의 이론을 기반으로 한 Fluid38요소를 적용하고 있다.

4. SMART 원자로 내부구조물의 축소모형의 모드시험 및 동특성 해석

원자로 냉각재와 접하는 원자로 내부구조물의 동특성을 유한요소 해석으로 평가하는데 이 해석평가 방법이 타당성을 검증하기 위하여 원자로 내부구조물을 1/12의 비율로 축소 모사하고 이에 대하여 동특성 시험 및 상용 컴퓨터 코드인 ANSYS를 이용하여 유한요소 해석을 수행한 다음 그 결과로 얻어지는 구조물의 고유진동수와 모드형상을 비교함으로써 원형 SMART 원자로 내부구조물에 대한 해석평가 방법의 적절성을

평가하였다. 그림 8은 축소 모사된 원자로의 형상을 보여주고 있으며 그림 9는 축소 모사된 원자로의 3차원 형상을 보여주고 있다. 그리고 그

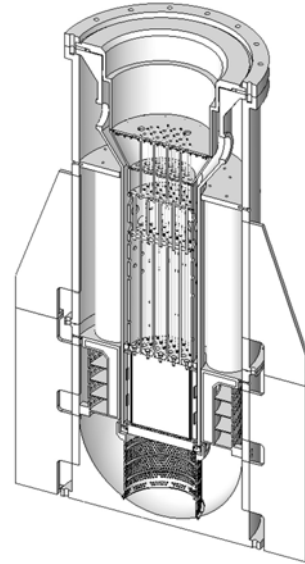


그림 8 조립된 축소모형의 원자로 단면

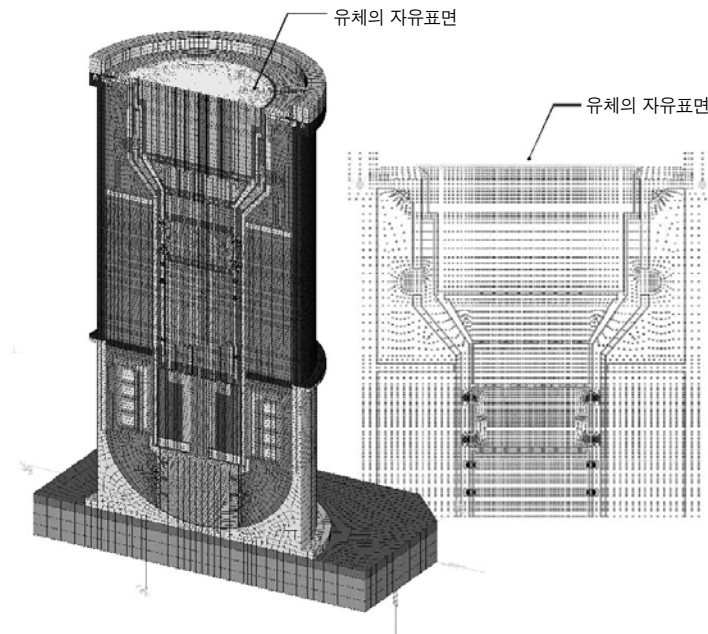


그림 9 조립된 축소모형의 SMART 원자로 유한요소 해석 모델

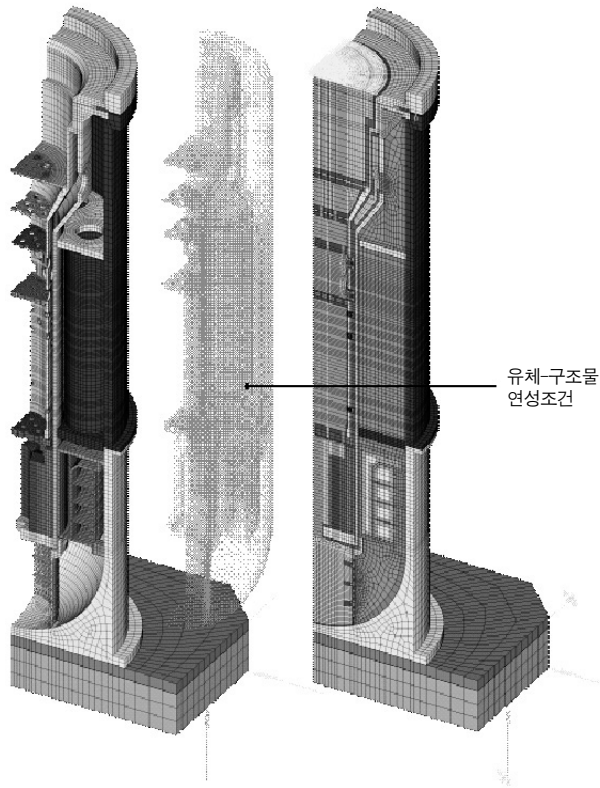


그림 10 조립된 축소모형의 SMART 원자로 유한요소 해석 모델에서 유체-구조물의 연성

림 10은 유한요소 해석에서 유체와 구조물의 연성(coupling)을 보여주고 있다. 축소된 원자로 내부구조물의 1차 고유진동수가 노심 지지배럴과 상부 안내구조물 지지배럴이 서로 역위상으로 진동하는 모드로 나타났으며, 2차 고유진동수는 이들 두 구조물이 동위상으로 진동하는 모드로 나타났다. 이 두 모드에서 모드시험으로 측정된 고유진동수와 유한요소 해석 결과에서 각각 약 5%의 오차를 나타내고 있음을 확인하였다. 1차 모드인 경우 접수 고유진동수가 공기중 노심지지배럴의 고유진동수의 36%, 상부안내구조물 지지배럴 공기중 고유진동수의 22%로 나타나 노심지지배럴과 상부안내구조물 지지배럴 사이의 유체 간격으로 인한 부가질량의 효과가 매우 크

게 나타나고 있음을 확인하였다.

5. 맺음말

원자로 내부구조물은 정상상태 및 과도운전 상태에서 원자로 냉각재와 접하고 있기 때문에 공기중의 동특성과 달라진다. 따라서 원자로 냉각재와 접하는 원자로 내부구조물의 동특성을 유한요소해석으로 평가하는데 원자로 냉각재로 인한 유체-구조물 연성의 영향을 고려한 해설절차가 개발되었고, 축소모형 시험으로 검증하였으며, 내진해석 및 배관과단해석과 같은 동적 응답해석 및 이로 인한 응력해석에 매우 유용하게 적용될 것으로 확신한다. **KSNVE**