

원자로 내부구조물의 동특성 및 결함해석

The Dynamic Characteristics and Defect Analysis of Pressurized Water Reactor Internals

안창기† · 박진호*, 이정환*, 최영철* · 송오섭**

Ahn Chang-Gi, Park Jin-Ho, Lee Jeong-Han, Chae Young-Chul and Song Oh-Seop

Key Words : Dynamic Characteristics(동특성), Pressurized Water Reactor Internals(가압경수형원자로 내부구조물), Internals(내부구조물), Defect Analysis(결함해석), Finite element analysis(유한요소해석)

ABSTRACT

Finite element model of pressurized water reactor internals were obtained using ANSYS software package to analyze dynamic characteristics. The pressure vessel, hold-down ring, alignment key, core support barrel(CSB), upper guide structure(UGS) and fluid gap were fully modeled using structural solid element(SOLID45) and fluid element(FLUID80) which is one of element types. Also modal analysis using the above finite element model has been performed. As a result, it was found that the fundamental beam mode natural frequency of the CSB were 8.2 Hz, the shell mode one 14.5 Hz. To verify the Finite Element Analysis(FEA), we compare the analysis result with experimental data that is obtained from the plant IVMS(internal Vibration Monitoring System). The experimental results are good agreement with the FEA model.

1. 서론

한국형 표준원자로인 가압경수형원자로는 운전 중 고온/고압의 냉각제 유동에 의한 진동현상을 겪게 되기 때문에 원전의 설계 및 건설시 반드시 그 영향을 평가하여 구조적 건전성을 입증하여야 한다. 따라서 과거 구조적 건전성을 확보하기 위한 여러 단순화된 유한요소 모델을 이용하여 원자로 내부구조물의 동특성해석을 수행해 왔지만 대부분의 단순화된 모델을 이용하였으므로 본 연구에서는 보다 상세한 유한요소모델을 개발하여 원자로 내부구조물의 동특성을 파악하고자 한다. 특히 개발된 유한요소모델은 실제 원자로의 가동 시 원자로 내부구조물의 동적응답을 예측하거나 내부구조물의 결함을 진단/예측하기 위한 수단으로 활용하기 위하여 지지조건의 결함상태에 따른 주파수 응답을 도출하고자 한다.

일반적으로 가압경수형원자로의 내부구조물은 노심을 제외한 노심지지원통(CSB, Core Support Barrel), 상부안내구조물(Upper Guide Structure), 노심용타리판구조물(Core Shroud Assembly), 정렬키(Alignment Key), 조임 링(Hold-down Ring) 및 하부지지구조물(Lower Support Structure) 등으로 구성되어 있다. 따라서 원자로내부구조

물의 동특성 해석모델을 개발하여 정상상태 출력 운전시 자유진동 모드해석을 수행하고 조임 링의 체결력 저하에 따른 모드해석 결과를 비교/검토할 수 있으며 모드해석을 통하여 얻어진 동특성 해석결과는 원자로 내부구조물의 진동감시시스템의 출력신호로부터 추출한 동특성 측정결과와 비교하여 유한요소모델의 타당성을 입증하고자 한다. 따라서 원자로 내부구조물의 발생될 수 있는 조임 링의 결함상태에서 동특성 변화를 확인하기 위하여 조화응답해석을 수행한다.

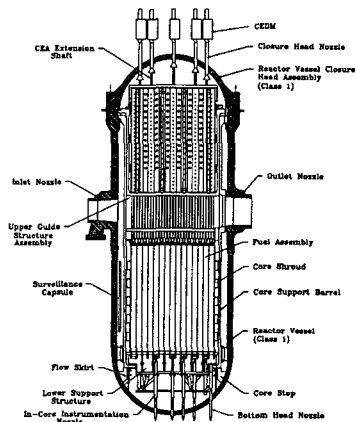


Fig. 1 Pressurized water reactor structure

† 신화기술정보

* 한국원자력연구소

** 충남대학교

2. 유한요소해석

2.1 구조물 및 유체 모델

구조물의 유한요소모델은 유체의 절점과 커플링을 고려하였으며, 노심지지원통 구조물의 경우 원주방향으로 56개의 절점, 축방향으로 56개의 동일한 절점으로 모델링 하였다.

상부안내구조물에 대해서는 원주방향으로 56개, 축방향으로 38개의 절점으로 작성하였으나 유한요소 모델의 절점들의 생성된 위치는 균일분포에 의한 것이 아니며, 노즐 부의 원형을 모사하기 위해서는 많은 절점이 필요하므로 그 주위에는 상대적으로 많은 절점들로 요소분할 하였다. 따라서 유체와 커플링을 위한 구조물에 사용된 요소는 3차원 고체요소(Solid45)⁽¹⁾이며, 또한 노심지지원통의 바닥부분 및 상부플랜지 부분도 고체요소를 적용하였고 전체적으로 32458개의 절점으로 구성된 31210개의 고체요소가 사용되었다.

노심지지원통과 원자로 압력용기 사이 및 노심지지원통과 상부안내구조물 사이의 유체는 단순히 질량효과만 고려하지 않고 좁은 간격으로 인한 유체의 탄성효과를 반영하기 위하여 유체요소를 이용하여 3차원적으로 모델링하였다. 이때 유체요소의 두께는 일정하다고 가정하고, 노심지지원통과 상부안내구조물 사이는 2겹(Layer)의 요소로, 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이는 3겹으로 모사하였다. 각 레이어는 동일한 두께로 설정되었으며, 모두 6면체의 유체요소(Fluid80)⁽¹⁾를 사용하였으므로, 2겹의 요소를 생성하기 위해서 3겹의 절점을 생성하였다. 유체의 모델링을 위해서는 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이의 간격 유체의 경우 원주방향으로 56개의 절점, 축방향으로 50개의 절점이 사용되었으며, 또한 노심지지원통과 상부안내구조물 사이의 경우에는 원주방향으로 56개의 절점, 축방향으로 32개의 절점이 사용되었다.

유체의 움직임은 반경방향에서 노심지지원통 벽면의 움직임과 일치하여야 하므로 이를 모사하기 위해 벽면의 절점과 유체의 절점을 반경방향으로 커플링 하였다. 이외의 다른 방향은 미끄러짐이 일어날 수 있도록 커플링 조건을 적용하지 않는다. 즉, 원주방향과 축방향으로는 유체와 구조사이에 미끄러짐이 일어날 수 있도록 하였다. 전체적으로 유체모델링을 위해서는 총 21102 개의 절점으로 구성된 19864 개의 유체요소가 사용되었다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 구조물사이의 간격유체를 3차원 유한요소모델링을 수행하여 동특성을 파악하기 위하여 구조물과 유체의 경계 절점과의 커플링을 수행하였으며 조립된 구조물과 구조물과도 일종의 경계조건으로 볼 수 있는 커플링 작업을 수행하였다. 따라서 Table 1은 각 구조물들의 커플링 상태를 나타내며, 원자로 압력용기는 노심지지원통에 비하여 그 두께가 크고 무거우므로 움직임이 없는 강

체(Rigid) 상태로 가정하여 압력용기 바깥쪽, 즉 원자로 압력용기의 외곽 절점만을 경계조건으로 X, Y, Z 방향으로 자유도를 구속 정의하여 해석을 수행하였다.

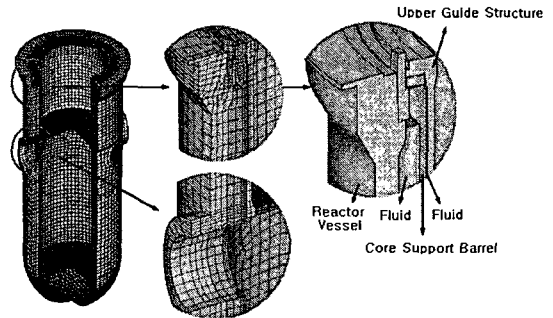


Fig. 2 Structure & fluid finite element model

Table 1 Coupling conditions for analysis

Coupling Direction	Part Name	
Radius	Upper guide structure	Fluid
Radius	Core support barrel	Fluid
Radius	Core support barrel	Fluid
Radius	Pressure vessel	Fluid
Radius	Core support barrel	Alignment Key
Radius	Upper guide structure	Alignment Key
Tangent	Core support barrel	Alignment Key
Tangent	Upper guide structure	Alignment Key
Axis	Core support barrel	Pressure vessel
Axis	Core support barrel	Hold-down ring

2.2 해석과정 및 결과

일반적으로 조립 구조물의 강제변위 해석은 그 커플링 및 변위를 이용하여 선형해석을 수행하게 되고 고유진동수 해석은 그 모드 추출방법에 따라 Reduced Method 또는 Non-Reduced Method로 구분할 수 있으며, Reduced Method는 상세한 모드형상을 필요로 하지 않는 경우 많이 사용하는 방법으로서 MDOF(Master Degree of Freedom)을 정의하여 계산을 효율적으로 수행할 수 있다.

Non-Reduced Method는 MDOF를 설정할 필요가 없으며, 반면 상세한 해석이 가능하기 때문에 해의 상세한 결과를 위하여 주로 많이 사용된다. 그러나 유한요소의 크기가 증가할 경우 계산시간이 매우 길어지는 단점이 있으나 본 해석에서는 유체요소가 포함되어 있어 보다 상세한 모드형상의 추출이 필요하므로 Non-Reduced Method의 하나인 Block-Lanchos Method⁽²⁾를 이용하여 모드를 추출하고 원

자로에 유입되는 냉각재 유체의 유입속도를 이용하여 노심 지지원통의 가진력을 계산하였고 감쇄가 있는 상태의 조화 응답해석을 수행하였다. 따라서 한국형 표준원자로의 원자로 내부구조물의 동특성을 파악하기 위하여 자유진동해석을 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 m 은 축방향 (Beam) 진동모드 수를 나타내며, n 은 원주방향(Shell) 진동모드 수를 나타낸다. 즉, 노심지지원통은 직경에 비하여 두께가 매우 작으므로(두께/직경=0.02) 전형적인 원통형 쉘 구조물이므로 축방향 및 원주방향 모드가 서로 커플링 되어 나타나게 된다. Mode 1과 Mode 2는 같은 진동모드로서 서로 직각인 수평방향 기본 빔 진동모드이다. 또 Mode 3과 Mode 4 같은 진동모드로서 기본 쉘 진동모드이다. 이와 같이 동일한 진동모드가 방향에 따라 그 진동수가 약간 차이가 나는 것은 노심지지원통이 완전한 축 대칭이 아니기 때문이다. Mode 5와 Mode 6도 같은 진동모드인 경우이다. 따라서 주파수가 높아질수록 일반적인 쉘 원통구조물의 경우처럼 빔 및 쉘 진동모드 형상이 다양하게 나타남을 알 수가 있다. 그러나 주파수가 증가할수록 모드의 주파수 밀도가 높아져 유한요소해석 결과의 오차가 증가하므로, 고차의 진동모드 해석이 필요할 경우에는 유한요소의 개수를 더 증가하여야 하며, 경계조건의 적용도 보다 상세하게 적용시켜야 한다.

Table 2 Core support barrel's natural frequency

Mode Number	Beam Mode (m)	Shell Mode (n)	Natural frequency (Hz)
1	1	1	8.21
2	1	1	8.25
3	2	2	14.57
4	2	2	14.85
5	2	3	19.09
6	2	3	19.16
7	2	4	21.09
8	2	4	23.70
9	3	3	26.16
10	3	3	26.65

또한 조임 링의 결함을 가정하여 유체의 유입 압력에 대한 조화응답해석의 응답위치는 Fig. 3에서와 같고 이때의 노심지지원통구조물의 응답결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 따라서 조화응답해석의 결과 그래프에서와 같이 조임 링의 결함 또는 지지조건의 결함으로 인한 주파수 변화는 쉘의 고유진동수 보다는 기본 빔 모드의 고유진동수가 크게 낮아짐을 알 수 있다.

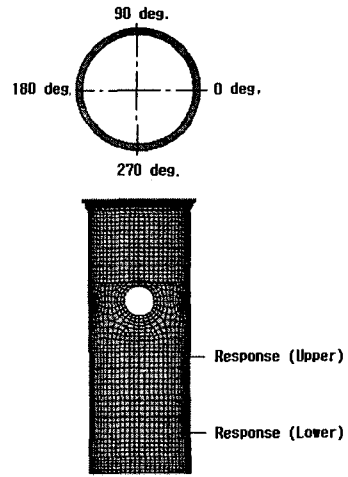


Fig. 3 CSB response location for analysis

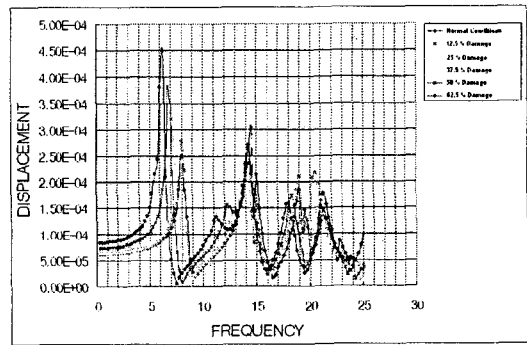


Fig. 4 Harmonic response results of upper location

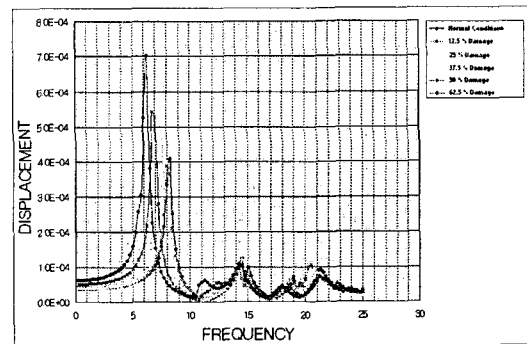


Fig. 5 Harmonic response results of lower location

3. 동특성 해석결과 검증

유한요소 해석을 통하여 구한 동특성 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 6과 같이 원자로에 설치되어 있는 원자

로 내부구조물 진동감시 시스템(IVMS, Internal Vibration Monitoring System)의 신호⁽³⁾를 이용하였으며 주파수 분석을 통하여 얻어진 원자로의 노심상부 및 하부의 노외중성자 신호들의 자기 파워스펙트랄 밀도함수(APSD), 상관도 및 위상차의 결과를 살펴보면 Fig. 7에서와 같이 기본 빔 모드 진동주파수가 약 8 Hz 이며, 기본 셸 모드 진동주파수는 약 15 Hz 임을 확인할 수 있다. 이 결과는 유한요소 해석 결과와 잘 일치하고 있으므로 유한요소 해석에서 얻은 3차원 유한요소 모델이 원자로 내부구조물의 동적해석 모델로 타당함을 알 수가 있다.

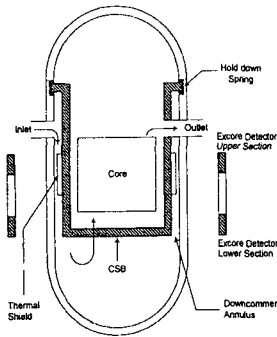


Fig. 6 Ex-core neutron detectors of PWR reactor

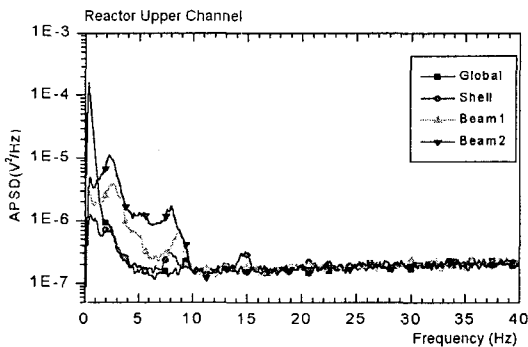


Fig. 7 APSDs for CSB modes

4. 결론

한국형 표준원자로인 가압경수형원자로 내부구조물에 대한 3차원 유한요소 모델링을 통하여 원자로 내부구조물의 동특성 해석을 수행한 결과 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 원자로 내부구조물에 대하여 유한요소모델링을 작성한 후 동특성해석을 수행 하였으며 그 결과 노심지지원통의 결합이 없는 정상상태의 운전조건에서는 빔 모우드 고유진동수는 약 8 Hz, 셸 모드의 고유진동수는 14.5Hz 부근에서

도출되었다. 이는 노외중성자 신호를 측정하여 분석한 주파수와 잘 일치하고 있으며 따라서 원자로 내부구조물의 3차원 유한요소모델의 타당성을 검증하였다.

(2) 진동모드를 추출하기 위하여 노외중성자 신호를 측정하고 기존의 주파수 분석기법과 모드 분리기법을 이용하여 노외중성자 잡음신호를 분석하였다. 이때 위상의 차이 및 상관도의 상대적인 상관관계를 통하여 중성자 신호의 APSD에 나타나는 피크들을 분석하여 노심지지원통의 빔 모드 및 셸 모드 등의 고유진동수를 판별하였다.

(3) 동적응답을 예측하기 위하여 작성된 3차원 유한요소 모델링은 원자로 내부구조물의 결함을 진단/예측하기 위하여 결합 부품인 조임 링의 지지 결합을 각각 12.5%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%를 가정하여 CSB의 빔 모드에 대한 동특성 변화를 분석하였다. 따라서 빔 모드의 8 Hz 부근의 고유진동수는 결합이 클수록 지지 강성의 변화로 인하여 그 고유진동수가 현저히 낮아짐을 알 수 있다.

따라서 본 연구를 통하여 타당성이 검증된 3차원 유한요소 모델링을 이용하여 원자로 내부구조물의 지지조건 결합 발생시 그 원인 분석에 활용할 수 있으며, 이때 국부적인 지지조건 뿐만 아니라 여러 가지 결합증상을 수행하여 원자로 내부구조물의 동적 응답거동에 대한 활용연구에 이용할 수 있으며 효과적인 진단/예측 및 방안을 위한 수단으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국원자력연구소의 과제료써 연구소의 지원으로 이루어졌으며, 본 논문을 위해 도움을 주신 과제책임자 및 지도교수님께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) ANSYS Inc, Element Reference Manual Volume III, 2003
- (2) ANSYS Inc, Theory Reference Manual Volume II, 2003
- (3) 박진호 외 3인, "중성자 신호를 이용한 원자로 내부구조물 진단기술에 관한 연구", 한국원자력연구소 연구보고서 (KAERI/RR-1386/93), 1994