

울진 1&2호기 원자로 내부구조물의 결함증상 시뮬레이션
Faults Simulation on Reactor Internals of Ujin 1&2 Nuclear Power PLant

류정수, 박진호, 남호운, 우종섭
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김태룡
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

울진 1&2호기 원자로 내부구조물의 원자로 압력용기와 노심지지원통의 결합부품인 hold-down ring과 열차폐체에 대한 인위적인 결함을 모사한 유한요소모델에 대한 동특성해석을 수행하였다. 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 무결함 정상상태에서 계산된 노심지지원통의 1차 beam 모드진동수, 8.4 Hz와 1차 shell 모드진동수, 18.7 Hz를 측정결과인 8.2 Hz와 20.5 Hz와 거의 일치하고 있다. Hold-down ring의 결함시 노심지지원통의 1차 beam 모드진동수의 변화는 결함율이 각각 10%, 20%, 50%와 80%까지 진행되었을 때, 진동수가 각각 5%, 18%, 54%와 92%로 감소되며, 1차 shell 모드진동수는 hold-down ring 결함율이 20% 이하에서는 5.3%로 거의 변하지 않고 있지만, 결함율이 50%와 80%가 되면 약 22%와 72%로 감소된다. 이는 결함율이 증가함에 따라 노심지지원통의 경계조건이 바뀌게 되어 큰 변화율을 보이는 것이다. 열차폐체의 결함은 hold-down ring이 정상일 경우에 노심지지원통의 beam 모드보다는 제 5 모드부터 제 8 모드인 shell 모드에서 진동수 변화율이 비교적 크게 나타났으며, 결함율이 25%, 50%, 75% 및 100%까지 진행되었을 때 이들 shell 모드진동수가 각각 최대 5%, 9%, 13% 및 20%까지 감소됨을 알 수 있었다.

Abstract

The dynamic characteristics analysis were performed for finite element model of Ujin 1&2 NPP reactor internals with artificial faults on the hold-down ring and the thermal shield. To prove the validity of the modelling, the fundamental beam and shell mode frequencies of core support barrel(CSB) in normal state are compared with those from the measurement results, which shows good agreement. According to the analysis results, the fundamental natural frequency of the CSB beam decreases by 5%, 18%, 54% and 92% for 10%, 20%, 50% and 80% partial faults of the hold-down ring respectively. And the fundamental shell natural frequency is within 5.3% for 20% partial faults, but decrease by 22% and 72% for 50% and 80% partial faults. For the faults of the thermal shield with the normal hold-down ring, frequency decreases of the higher shell modes are more than the beam modes and the 5th to 8th natural frequencies decrease by 5%, 9%, 13% and 20% for 25%, 50%, 75% and 100% partial faults respectively.

1. 서 론

가압경수로형 원자로의 내부구조물은 원자로 내부에 흐르는 고온 고압의 냉각수에 의한 유체유발진동(flow-induced vibration)이 항상 존재하여 내부구조물간의 체결력이 저하되기도 하고, 체결부품이 파손, 이탈되어 냉각재 유로를 따라 이동함으로써 노심 유로를 차단할 뿐아니라 타 기기에 손상을 주기도 한다. 이는 원자로 내부구조물의 손상 사례와 그 원인에 대한 통계에 나타난 바와 같이 내부구조물중 가장 손상이 많은 부위가 바로 노심지지원통(CSB: core support barrel)[1]이며 그 원인으로서는 진동 및 그와 관련한 피로현상이 절반이나 되어 유체유발진동이 원자로 계통의 매우 중요한 문제 중의 하나임을 알 수 있다. 따라서 원자로내의 유체유발진동 영향을 평가하여 원자로 내부구조물의 구조적 건전성을 입증하는 것은 원전의 설계 및 건설에 반드시 요구되는 사항이 되었다.[2] 그러나 원자로 내부구조물의 구조적 건전성이 입증된 후 발전소가 가동된다 하더라도, 운전연수가 증가하면 구조물 상호간의 체결력 저하 또는 상실, 부품의 파손과 부품 이탈에 따른 노심의 유로 차단, 또는 비정상적인 진동 등 여러가지 결함증상이 발생한다. 이러한 현상을 조기에 탐지하고 보수하여야 원전의 중대 사고를 예방할 수 있고 안전성을 확보할 수 있으므로 원자로 계통에 대한 주기적인 감시 및 진단활동이 필수적이라 하겠다.

가압경수로 원자로내부구조물의 고장사례를 살펴보면 노심지지원통 및 열차폐체(thermal shield)의 고장이 가장 많이 발생하였으며 전체의 약 38%가 된다. 그 원인으로서는 유체유발진동에 의한 경우가 전체의 27%로 가장 많았다.[3] 현재까지 국외에서의 잡음처리 연구결과 및 경험을 토대로 노심지지원통 및 열차폐체의 고장에 따른 원자로 내부구조물의 진동특성의 변화는 노심지지원통 노즐부이나 원자로 압력용기의 플랜지부 또는 결합 부품인 hold-down ring에서의 결함이 있으면 노심지지원통의 beam 진동모드 진동수가 변하며, 노심지지원통과 baffle 또는 노심지지원통과 열차폐체 사이의 결합성에 결함이 있으면 노심지지원통의 shell 진동모드 진동수가 변한다.[4]

따라서 본 연구에서는 울진 1&2호기 원자력발전소의 원자로 내부구조물인 노심지지원통의 hold-down ring과 열차폐체에 결함이 있을 때, 노심지지원통의 beam 진동모드와 shell 진동모드 진동수의 변화를 계산하였으며, 원자로 계통에 대한 주기적인 감시 및 진단활동과 결함진단 소프트웨어의 진단기준[3,5,6]으로 활용하고자 한다. 이를 위하여 정상상태에서의 울진 1&2호기 원자로 내부구조물을 유한요소 모델한 후, 이 모델에 대하여 인위적인 결함 조건을 가해 줌으로써 결함에 따른 동특성을 모사(simulation)할 수 있었다. 유한요소 모델의 타당성을 입증하기 위하여 구조해석용 프로그램인 ANSYS[7]를 이용하여 동특성해석을 수행하였으며 측정된 노외중성자 신호분석 결과와 비교, 검토한다.

2. 원자로 내부구조물의 유한요소 모델링[3,6]

2.1 기하학적 단순화

울진 1&2호기가 다른 국내 원자로와 다른 특징은 부분적인 열차폐체를 갖고 있다는 점이다. 울진 1&2호기의 원자로내부구조물 전체(핵연료 포함)의 동특성해석을 위한 기하학인 모델로는 노심지지원통과 열차폐체만으로 간략화하여 그림 1에 설정하였다. 따라서 노심지지원통과 열차폐체를 제외한 모든 내부구조물 및 핵연료는 강성을 무시하고 그 질량만

노심지지원통과 열차폐체에 더하는 형태로 간략화하였다. 노심지지원통 내부에 있는 유체(물)는 부가질량으로 처리하였으며 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이에 있는 유체는 부가질량의 효과로 표현하지 않고 유체요소로 모델링하였다. 이는 핵연료의 국소적인 진동을 제외하면 실제 노심지지원통과 열차폐체의 진동상황을 잘 묘사하는 모델로 그 타당성이 입증되어 많은 원자로 내부구조물의 진동분석에 활용되고 있다.

원래의 노심지지원통은 벽의 두께 등이 일정치 않은 부분이 있는데, 이를 일정한 두께의 벽으로 단순화하였고, 여러가지 연결부와 작은 구멍, 또는 작은 부품들은 무시하였다. 냉각수의 출입구를 위해 압력용기의 구멍과 일치하는 구멍이 3개가 있는데, 이 주위의 구조도 실제 노심지지원통과는 다르게 단순한 구조로 간략화하였다. 노심지지원통에는 열차폐체가 4개 부착되어 있는데, 이 부착의 구조도 실제의 경우에는 연결부로 연결되어 있으나, 이 모델링에서는 노심지지원통에 열차폐체가 완전 밀착되어 있는 것으로 단순화 하였다. 즉, 열차폐체의 두께와 노심지지원통 벽면의 두께를 합한 두께를 가진 벽면으로 묘사하였다. 또, 위에 언급한 3개의 냉각수 출입구도 유한요소 모델의 특성상 완전한 원형이 아닌 16각형 또는 18각형의 구멍으로 묘사하였다.

한편, 노심지지원통의 바닥재의 경우는 많은 구멍이 있으나, 이를 무시하고 구멍이 없는 완전한 바닥으로 가정한 후, 그 부분의 밀도를 낮추어 구멍으로 인한 질량감소의 효과를 표현하였다. 또한 플랜지 부근에서의 구조도 실제 노심지지원통에서는 원형 마무리 처리가 되어 있으나, 모델링에서는 직각으로 꺾이도록 단순화 하였다. 그러나, 노심지지원통의 높이, 직경, 두께, 그리고 전체의 무게등은 실제의 경우와 같도록 모델링하였다. 또한 열차폐체의 위치, 크기는 실제의 노심지지원통과 일치하도록 하였으며, 구멍의 경우도 그 위치와 크기등을 실제 원자로와 일치하도록 하였다.

2.2 재료물성치

울진 1&2호기의 원자로내부구조물(노심지지원통 와 열차폐체)은 모두 스테인레스강(304S)으로 제조되어 있으며 운전온도(약 300℃)에서의 재료물성치는 다음과 같다.

밀도 (ρ) : 7900 kg/m³

탄성계수 (E) : 177.6 GPa

Poisson 비 (ν) : 0.3

이 재료의 물성치는 변하지 않는 것이나 앞에서 설명한 바와 같은 여러가지 기하학적인 간략화로 인한 특성의 변화를 고려하여야 하므로, 이를 밀도의 변화로 모델링에 반영한다. 노심지지원통 벽면과 바닥재 및 열차폐체 부분 벽면의 밀도는 참고문헌 [3]에 따라 산정하였다. 먼저 노심지지원통 벽면의 밀도는 재료물성치와 baffle의 질량효과에 의한 밀도변화 및 유체부가질량효과를 합산하면, 22305.8 kg/m³이 된다. 노심지지원통의 바닥부분은 유체가 통과할 수 있는 구멍 등이 많은 복잡한 구조를 가지고 있는데 이를 모두 무시하고 일정한 두께를 가진 판재로 이루어진 바닥을 가정하였으므로 그 밀도는 원래의 재료의 밀도가 아닌 계산된 밀도로 대치되어야 한다. 핵연료다발 및 기타 구조물(upper internal 및 lower core plate)의 질량효과를 더한 노심지지원통 바닥재의 밀도변화는 24448 kg/m³로 산정되었다. 또한, 열차폐체가 있는 노심지지원통 벽면의 부분은 두께가 다른 벽면에 비하여 2배 두꺼운 것을 고려하여 구한 벽면의 밀도는 15102 kg/m³이 된다.

2.3 유한요소모델

2.3.1 노심지지원통과 열차폐체 모형화

앞에서 계산된 재료의 물성치와 기하학적 단순화를 통하여 ANSYS 5.4[7]를 사용하여 유한요소 모델링을 수행하였다. 기하학적으로 단순화된 모델을 유체와의 coupling을 고려하여, 원주방향으로 44개의 절점, 축방향으로 44개의 절점이 생성되도록 모델링하였다. 이 절점들이 생성된 위치는 균일분포에 의한 것이 아니며, 모델링 과정에서의 필요에 의해 설정되었다. 즉, 원형의 구멍을 모사하기 위해서는 많은 절점이 필요하므로 그 주위에는 많은 절점들이 설정되었고, 열차폐체 등이 있는 부분은 그 위치를 정확히 모델링하기 위해 필요한 부분에 많은 절점들이 설정되었으나, 특이점이 없는 부분에서는 적은 수의 절점이 설정되었다. 사용된 요소의 종류는 4개의 절점으로 구성되는 평면에 지정된 두께를 자동으로 생성할 수 있는 3차원 요소인 SHELL 63 고체요소이다. 전체적으로 노심지지원통을 모델링하기 위해 1936개의 절점으로 구성된 1892개의 셸요소가 사용되었다.

2.3.2 유체 모형화

노심지지원통 내부에 있는 유체는 부가질량으로 처리하였으며 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이에 있는 유체는 유체요소로 모델링하였다. 유체의 두께는 23.8 cm로 일정하다고 가정하고, 2겹의 유체요소로 모델하였다. 첫번째와 두번째 layer는 동일한 두께로 설정되었으며, 6면체 유체요소인 FLUID 80을 사용하였으므로 2겹의 요소를 생성하기 위해 3겹의 절점 layer가 생성되어야 한다. 유체의 모델링을 위해서는 원주방향으로 44개의 절점, 축방향으로 35개의 절점이 사용되었으며, 노심지지원통과 열차폐체 모델과 반경방향으로 연속되는 점을 절점으로 설정하였다.

특히 유체요소의 절점 생성에서 유의하여야 할 점은 고체요소와 coupling 관계 설정이 용이한 위치에 유체절점을 설정하여야 하고 셸요소를 이용하는 노심지지원통의 두께를 고려하여 유체 절점을 설정하여야 한다는 점이다. 즉 셸 형태의 고체요소는 절점 위치가 셸 요소의 중립축에 설정되므로 셸 두께의 절반만큼 유체요소가 커지는 것을 방지하기 위하여 고체요소와 유체요소가 대응되는 절점들 사이의 좌표상 차이가 있도록 하였다.

유체의 움직임은 반경방향으로 노심지지원통 벽면의 움직임과 일치하여야 하므로, 이를 모사하기 위해 벽면의 절점과 유체의 절점을 반경방향으로 coupling한다. 이외의 다른 방향은 slip이 일어날 수 있도록 coupling을 하지 않는다. 즉, 원주방향과 축방향으로는 유체와 고체 사이에 미끄러짐이 일어날 수 있도록 한다. 또한, coupling되지 않은 유체 절점은 결과에 좋지 않은 영향을 미치게 되므로 이를 방지하기 위해, 노심지지원통의 구멍부분과 일치하는 부분에 유체 layer에도 4각형의 구멍을 내어 유체요소와 절점들을 제거하였다. 전체적으로 유체모델링을 위해서는 1540개의 절점이 3겹으로 설정되어 총 4620개의 절점으로 구성된, 2992개의 요소가 사용되었다.

2.3.3 경계조건

우선 유체의 바깥쪽 layer의 모든 방향 자유도를 구속한다. 모델링에 포함되지는 않았지만, 유체의 바깥쪽에는 원자로 압력용기가 있기 때문이다. 이 압력용기는 노심지지원통에 비하여 대단히 크고 무거우므로 움직임이 없는 것으로 가정한다. 노심지지원통의 플랜지 부분의 고정은 가장 바깥쪽의 원을 따라 설정된 절점들은 모든 자유도를 구속하고, hold-down ring에 접촉하게 되는 면(원형의 띠 모양)에 위치한 절점들의 경우에는 원주축

방향(z방향)의 자유도만을 구속하였다.

2.3.4 Master DOF 선정

ANSYS에는 master degree of freedom(MDOF)을 자동으로 설정해 주는 기능이 있는데, 유체가 포함된 모델링에 사용되어서는 안된다. 그러므로 관심 영역의 정보가 충분히 드러나도록 직접 MDOF를 설정하여야 한다. 그러나 많은 수의 MDOF는 모델의 계산시간을 기하급수적으로 늘어나게 하는 원인이 되므로, 적당한 양의 MDOF를 효율적으로 설정하여야 한다.

Beam 모드의 특성이 나타나도록 원주의 축을 따라 내려오면서(수직 z방향) 3등분이 되도록 3줄로 MDOF를 설정한다. 1줄에 존재하는 44개의 절점중, 움직임이 거의 없는 플랜지와 밑바닥 부분을 제외한, 35개의 절점만이 MDOF설정의 대상이 되는데, 이 모델에서는 3 절점당 1개의 MDOF를 설정하여, 1줄에 11개의 MDOF를 설정하였다. 즉, beam 모드의 관찰을 위해 33개의 절점에 MDOF를 설정하였다. 또한 원주(θ 방향)의 주변을 따라서 돌며 3줄로 MDOF를 설정한다. 이때 θ 방향으로 설정하는 MDOF는 shell 모드의 특성이 잘 나타나도록 구멍의 아랫부분에 1줄, 중간 위치에 2줄을 설정한다. 원주방향 1줄에 44개의 절점이 존재하는데, 3 절점당 1개의 MDOF를 설정하여 1줄에 14개씩 설정하였으므로, shell 모드의 관찰을 위해서 42개의 절점에 MDOF를 설정하였다.

이 모델은 열차폐체와 구멍 등으로 인해 대칭의 구조를 상실하였으므로, x와 y방향의 자유도 모두에 MDOF를 설정하여야 한다. 즉, 1개의 지정된 절점에서 2개의 MDOF가 설정되어야 한다. 그러므로 beam 모드를 위한 33개와 shell 모드를 위한 42개의 절점에 2개씩의 MDOF가 설정되어, 총 150개의 MDOF가 설정되었다.

2.4 동특성해석 결과 및 검증

무결함 정상상태인 울진 1&2호기의 원자로내부구조물(노심지지원통과 열차폐체)의 동특성을 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하여 표 1과 같은 결과를 얻었다. 표 1에서 제 1번과 제 2번은 같은 모드로써 서로 직각인 수평방향 1차 beam 모드이며, 제 1 모드를 그림 2에서 보여준다. 제 3번과 제 4번도 같은 모드로 1차 shell 모드이며, 제 3 모드가 그림 3에 나타나 있다. 이와 같이 같은 진동모드가 방향에 따라 그 진동수가 다른 것은 원자로 내부구조물(노심지지원통과 열차폐체)의 유한요소모델이 완전한 축대칭이 아니기 때문이다.

또한 제 5번과 제 6번도 같은 진동모드이며, 1차 beam 모드이면서 3차 shell 모드인 형상을 가진다. 그리고 제 7번 모드는 1차 beam 모드이면서 4차 shell 모드이며, 제 8번 모드는 2차 beam 모드이면서 3차 shell 모드인 형상을 가진다.

울진 1&2 호기의 노외중성자, 노내중성자, 및 압력변동 신호 등에 대한 위상분리기법[6,8]으로 잡음신호 분석 결과, 노심지지원통의 1차 beam 모드 진동수가 약 8.2 Hz, 1차 shell 모드 진동수는 약 20.5 Hz로 나타났다. 이들을 해석결과와 비교하면 1차 beam 모드 진동수는 잘 일치하는 것으로 나타난 반면, 1차 shell 모드의 경우는 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 원자로 내부구조물이 거대한 구조물이고, 특히 수중구조물이므로 이 정도의 차이는 모델링 과정에서 나타날 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 노심지지원통의 beam 모드에 대한 일치성을 근거로 울진 1&2호기 내부구조물의 유한요소 모델의 타당성을 입증한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 비정상 결함상태의 원자로 내부구조물의 동특성 변화를 유한요소 모델에 인위적으로 결함을 가해주므로써 충분히 모사할 수 있다고 판단된다.

3. 원자로 내부구조물에 대한 결함증상 시뮬레이션

3.1 Hold-down ring의 결함증상 시뮬레이션

3.1.1 유한요소 모델상의 결함

원자로의 hold-down ring 상의 결함은 주로 장기간의 운전에 따른 체결력의 저하 등으로 나타나며, 이를 원자로 내부구조물의 유한요소모델에서 표현은 노심지지원통의 상부 경계조건의 완화로 나타낼 수 있다. 즉 노심지지원통 상부의 경계조건은 정상상태시 완전한 고정상태인 모든 자유도가 구속되나 이를 완화하는 것은 고유진동수 변화가 가장 큰 곳에 집중적으로 결점의 자유도를 푸는 것으로 결함을 시뮬레이션하였다.

3.1.2 동특성의 변화

노심지지원통 상부의 원주방향으로 44개의 결점 중, 한 곳의 결점의 자유도를 풀어서 경계조건을 완화시켜 고유진동수의 변화를 계산하였다. 표 2는 총 44개 결점중에서 2개(5%), 4개(10%), 6개(15%), 8개(20%), 16개(35%), 22개(50%), 26개(60%), 31개(70%) 및 35개(80%)의 결점의 자유도를 풀었을 때 계산된 고유진동수의 변화를 보인 것이다. 첫 번째 모드에서 가장 큰 변화를 보여주고 있으며 결함율이 커짐에 따라 고유진동수가 작아지는 것을 알 수 있다.

경계조건의 결함율에 따라 고유진동수 변화율을 계산하여 표 2의 괄호속에 정리하였다. 이 표 2의 결과로부터 hold-down ring의 결함으로 발생하는 원자로 내부구조물의 진동특성 변화는 이미 예측된 바와 같이 노심지지원통의 beam 모드와 shell 모드 진동수의 변화로 나타남을 알 수 있다. 노심지지원통의 결함부품인 hold-down ring의 결함시 결함 진단에 활용할 수 있는 1차 beam 모드 진동수의 변화는 결함율이 각각 10%, 20%, 50%와 80%까지 진행되었을 때, 진동수가 각각 5%, 18%, 54%와 92% 정도로 감소되며, 노심지지원통의 1차 shell 모드 진동수는 hold-down ring 상의 결함이 20% 이하에서는 5.3%로 거의 변하지 않고 있지만, 결함율이 50%, 60%와 80%가 되면 약 22%, 41%와 72%로 감소되는 것을 알 수 있었다. 이는 결함율이 증가함에 따라 노심지지원통의 shell 경계조건이 바뀌게 되어 큰 변화를 보이고 있는 것임을 알 수 있다. 그림 4와 그림 5에서는 hold-down ring 60% 결함인 노심지지원통의 제 3번과 제 6번 모드형상을 보여준다.

3.2 열차폐체의 결함증상 시뮬레이션

3.2.1 유한요소 모델상의 결함

원자로의 열차폐체상의 결함은 주로 장기간의 운전에 따른 유체유발진동에 의하여 연결부가 약화되고 결국 열차폐체가 이탈되는 현상이 발생할 것으로 예상된다. 열차폐체는 4개로 두께 50.8mm, 높이 약 3.75m, 폭은 1.276m(TS1, TS2, TS4)와 0.934m(TS3)로 노심지지원통과 38개의 핀과 볼트로 연결되며 풀림방지를 위하여 용접되어 있다. 유한요소 모델상의 결함은 정상상태 hold-down ring에 대하여 한 개의 열차폐체 내에서의 국부적인 결함보다는 노심지지원통의 진동수에 크게 영향을 미치는 전체적인 노심지지원통의 거동에 초점을 두고, 90° 간격의 4개 열차폐체중에서 1개, 2개, 3개 그리고 4개 모두가 이탈되는

결합인 25%, 50%, 75% 및 100% 결합으로 모사하였다. 열차폐체가 결합으로 이탈되면 열차폐체의 두께 만큼을 제외한 실제 노심지지원통 벽두께를 사용하여 강성(기존의 해석 모델에서는 1/2배)을 줄였으며, 질량은 열차폐체 부분의 노심지지원통 벽면이 받는 질량밀도 대신에 원래의 노심지지원통 벽면밀도를 사용하여 모델링하였다.

3.2.2 동특성의 변화

노심지지원통 상부의 원주방향으로 44개의 결점 자유도를 모두 고정한 hold-down ring의 결합이 0%인 정상상태 경계조건에서 열차폐체의 결합을 변화에 따라 노심지지원통의 동특성 변화를 고찰하였다. 표 3에서는 열차폐체 결합을 25%, 50%, 75% 및 100%에 따른 제 1 모드부터 제 10 모드까지 고유진동수의 변화율을 계산하여 정리한 것이다. 여기서 25%의 결합은 열차폐체 4개중에 각각 1개의 결합을 나타내므로 4 경우의 수가 되며, 그 결과들의 차이는 매우 작았다. 또한 50%와 75%의 결합은 열차폐체 4개중에 각각 2개와 3개의 결합으로 각각 6 과 3 경우의 수가 되며, 그 결과들의 차이도 매우 작았다. 따라서 효율적인 분석을 수행하기 위하여 확률적으로 가능한 경우를 모두 고려하여 고유진동수를 구한 후, 평균값을 구하였다.

열차폐체의 결합율이 증가함에 따라 고유진동수가 점진적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 결합율이 25%(4개중에 1개 이탈)에서는 거의 변하지 않고 있다. 열차폐체의 100% 결합율인 경우 1차 beam 모드에 대하여 고유진동수 변화율이 1.76%, 1차 shell 제 4 모드에서 고유진동수 변화율이 6.26%로 매우 작았으며 beam 모드보다 shell 모드에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

표 3으로부터 열차폐체의 결합이 25%, 50%, 75% 및 100%까지 진행되면 제 5 모드부터 제 8 모드인 shell 모드 진동수가 각각 최대 5%, 9%, 13% 및 20%까지 감소하며 다른 모드에 비해 큰 변화를 보여준다. 그리고 제 9 모드와 제 10 모드 형상은 2차 beam 모드형상을 나타내기 때문에 열차폐체의 결합율에 따라 진동수의 변화율이 작은 것으로 판단된다. 따라서 hold-down ring이 정상일 경우 열차폐체의 결합 정도를 진단하기 위해서는 beam 모드보다는 고차 shell 모드인 제 5 모드부터 제 8 모드까지를 사용하여 진단하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

울진 18&2호기 원자로 내부구조물의 원자로 압력용기와 노심지지원통의 결합부품인 hold-down ring과 열차폐체에 대한 결합을 모사한 유한요소모델에 대한 동특성해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 무결합 정상상태에서 노심지지원통의 1차 beam 모드 고유진동수는 8.4 Hz, 1차 shell 모드 고유진동수는 18.7 Hz로 노외 중성자신호를 측정하여 분석한 결과인 8.2 Hz와 20.5 Hz와 거의 일치하고 있다.
- 2) 노심지지원통의 결합부품인 hold-down ring의 결합시 1차 beam 모드 진동수의 변화는 결합율이 각각 10%, 20%, 50%와 80%까지 진행되었을 때, 진동수가 각각 5%, 18%, 54%와 92% 정도로 감소되며, 노심지지원통의 1차 shell 모드 진동수는 hold-down ring 상의 결합이 20% 이하에서는 5.3%로 거의 변하지 않고 있지만, 결합율이 50%와 80%가 되면 약 22%와 72%로 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 결합율이 증가함에 따라 노심지지원통의 경계조건이 바뀌게 되어 큰 변화율을 보이는 것이다.

- 3) 열차폐체의 결함으로 발생하는 원자로 내부구조물의 진동특성의 변화는 hold-down ring이 건전할 경우에 노심지지원통의 beam 모드보다는 제 5모드부터 제 8 모드인 shell 모드 진동수에서 크게 나타났으며, 열차폐체의 결함율이 25%, 50%, 75% 및 100%까지 진행되었을 때 shell 모드 진동수가 각각 최대 5%, 9%, 13% 및 20%까지 감소되어 고차 shell 모드인 제 5 모드부터 제 8 모드까지를 사용하여 결함진단하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

5. 참고 문헌

- [1] Paidoussis, "Flow-Induced Vibration in Nuclear Reactors and Heat Exchangers," Practical Experiences with FIV, E. Naudascher and D. Rockwell ed., Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.20, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals Preparation and Initial Startup Testing, Rev.2, 1978.
- [3] 김태룡, 정승호, 박진호, 박진석, "중성자 신호를 이용한 원자로 내부구조물 진단기술에 관한 연구", 연구보고서, KAERI/RR-1386/94, 한국원자력연구소, 1994.
- [4] Lubin, B.T. et al., "Analysis of Internals Vibration Monitoring and Loose Part Monitoring Systems Data Related to the St. Lucie 1 Thermal Shield Failure", SMORN V, Progress in Nuclear Energy, Vol.21, pp.117-1126, 1988.
- [5] 정승호, 박진석, 김태룡, "기계적 결함이 있는 원자로 내부구조물의 유한요소해석", 대한기계학회논문집(A), 제 21권 제 8호, pp.1270-1275, 1997.
- [6] 박진호 외 7인, "원자로 잡음을 이용한 결함진단 기술개발", 연구보고서 KAERI/RR-1908/98, 한국 원자력연구소, 1999.
- [7] ANSYS User's Manual for Revision 5.4, 1998, Swanson Analysis System, Inc.
- [8] S.H. Jeong and T.R. Kim, "Phase Separation Algorithm for Ex-core Neutron Signal Analysis", Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 29 No. 5, pp.399-405, 1997.

표 1. 울진 1&2호기 노심지지원통 모델의 고유진동수(Hz)

Mode	Beam 모드	Shell 모드	계산된 고유진동수	측정된 고유진동수
1	1	1	8,388	8,2
2	1	1	8,396	
3	1	2	18,007	20,5
4	1	2	18,673	
5	1	3	19,782	-
6	1	3	21,419	
7	1	4	33,113	-
8	2	3	35,884	-

표 2. Holddown Ring 결함율에 따른 고유진동수(Hz)의 변화율(%)

Mode	0 % 정상	5 % 결함	10 % 결함	15 % 결함	20 % 결함	35 % 결함	50 % 결함	60 % 결함	70 % 결함	80 % 결함
1	8,388	8,272 (1.4)	7,967 (5.0)	7,451 (11.2)	6,841 (18.4)	5,311 (36.7)	3,854 (54.1)	2,392 (71.5)	1,219 (85.5)	0,637 (92.4)
2	8,396	8,392 (0.1)	8,382 (0.2)	8,352 (0.5)	8,289 (1.3)	7,806 (7.0)	6,284 (25.2)	4,081 (51.4)	2,470 (70.6)	1,724 (79.5)
3	18,007	17,900 (0.6)	17,633 (2.1)	17,282 (4.0)	17,044 (5.3)	16,806 (6.7)	13,992 (22.3)	10,643 (40.9)	7,259 (59.7)	5,004 (72.2)
4	18,673	18,664 (0.1)	18,636 (0.2)	18,551 (0.7)	18,349 (1.7)	16,867 (9.7)	15,998 (14.3)	12,858 (31.1)	8,846 (52.7)	6,721 (64.0)
5	19,782	19,701 (0.4)	19,561 (1.1)	19,462 (1.6)	19,436 (1.8)	19,329 (2.3)	18,797 (5.0)	16,567 (16.3)	14,424 (27.0)	12,445 (37.1)
6	21,419	21,403 (0.1)	21,358 (0.3)	21,257 (0.8)	21,100 (1.5)	20,828 (2.8)	19,588 (8.6)	18,818 (12.1)	18,092 (15.5)	17,227 (19.6)
7	33,113	33,105 (0.02)	33,060 (0.2)	32,941 (0.5)	32,766 (1.1)	27,997 (15.5)	20,725 (37.4)	20,051 (39.5)	19,772 (40.3)	18,180 (45.1)
8	35,884	35,872 (0.03)	35,824 (0.2)	35,577 (0.9)	34,914 (2.7)	32,743 (8.8)	32,065 (10.6)	24,439 (31.9)	20,077 (44.1)	19,589 (45.4)
9	36,189	36,131 (0.2)	36,003 (0.5)	35,894 (0.8)	35,838 (1.0)	35,405 (2.2)	32,573 (10.0)	31,993 (11.6)	30,088 (16.9)	27,318 (24.5)
10	36,396	36,373 (0.1)	36,319 (0.2)	36,234 (0.4)	36,156 (0.7)	35,975 (1.2)	35,712 (1.9)	35,040 (3.7)	32,606 (10.4)	31,749 (12.8)

* () : 진동수의 변화율 = $\frac{\text{정상상태 진동수} - \text{경계조건 완화시의 진동수}}{\text{정상상태 진동수}}$

표 3. 열차폐체 결함율에 따른 평균진동수(Hz) 및 변화율(%)

Mode	0 % 정상	25 % 결함	50 % 결함	75 % 결함	100 % 결함
1	8,388	8,352 (0.43)	8,314 (0.88)	8,275 (1.35)	8,240 (1.76)
2	8,396	8,360 (0.43)	8,326 (0.83)	8,291 (1.25)	8,261 (1.61)
3	18,007	17,877 (0.72)	17,722 (1.58)	17,553 (2.52)	17,457 (3.05)
4	18,673	18,163 (2.73)	17,884 (4.23)	17,646 (5.50)	17,504 (6.26)
5	19,782	19,235 (2.77)	18,572 (6.12)	18,042 (8.80)	17,608 (10.99)
6	21,419	20,381 (4.85)	19,500 (8.96)	18,621 (13.06)	17,822 (16.79)
7	33,113	31,797 (3.97)	30,518 (7.84)	29,288 (11.55)	28,463 (14.04)
8	35,884	35,481 (1.12)	33,703 (6.08)	31,203 (13.05)	28,689 (20.05)
9	36,189	35,669 (1.44)	35,224 (2.67)	34,912 (3.53)	34,871 (3.64)
10	36,396	36,116 (0.77)	35,525 (2.39)	35,345 (2.89)	34,988 (3.87)

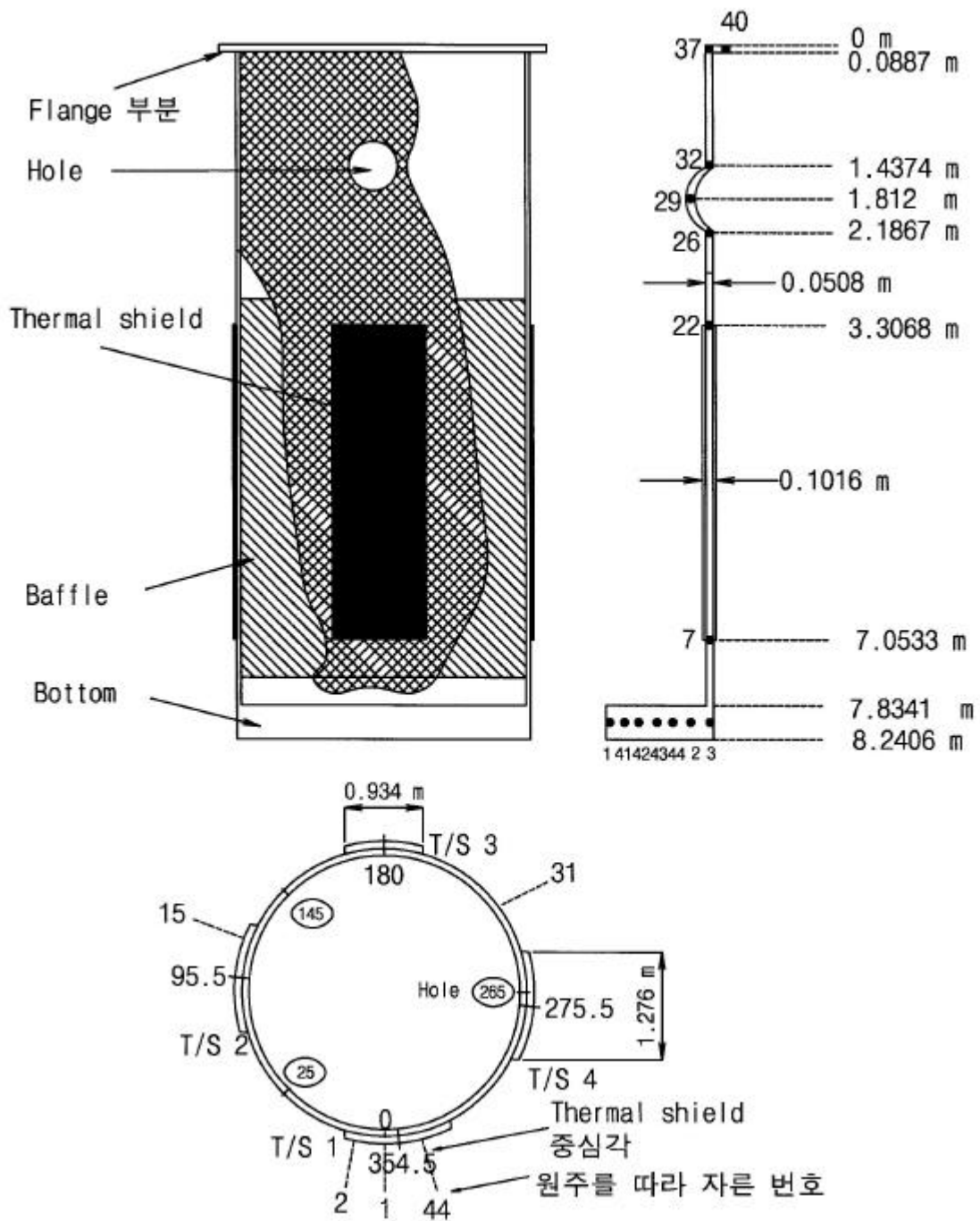


그림 1 울진 1&2호기 원자로 내부구조물의 기하학적 모델

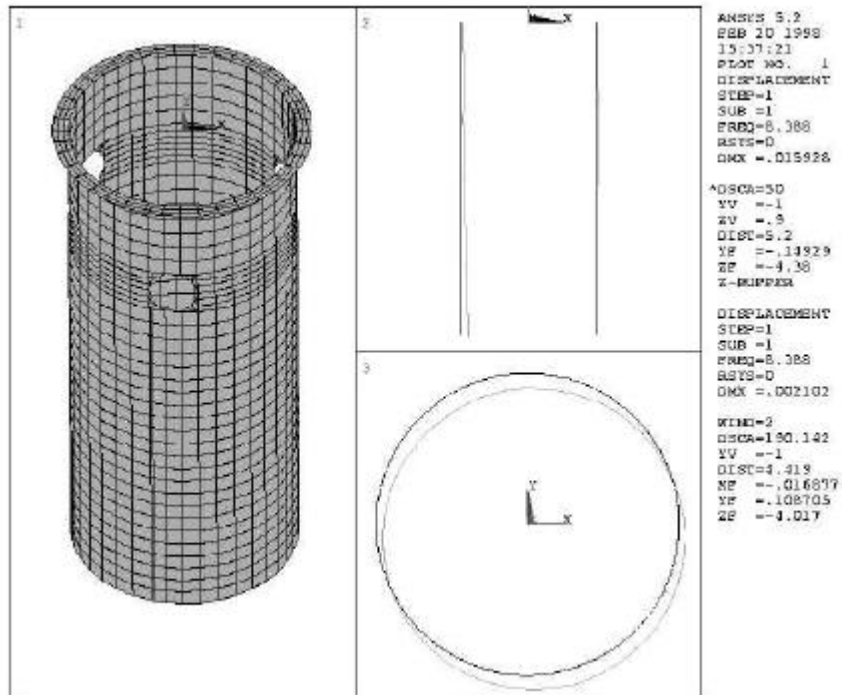


그림 2 정상상태 노심지지원통의 제 1 모드 형상(beam)

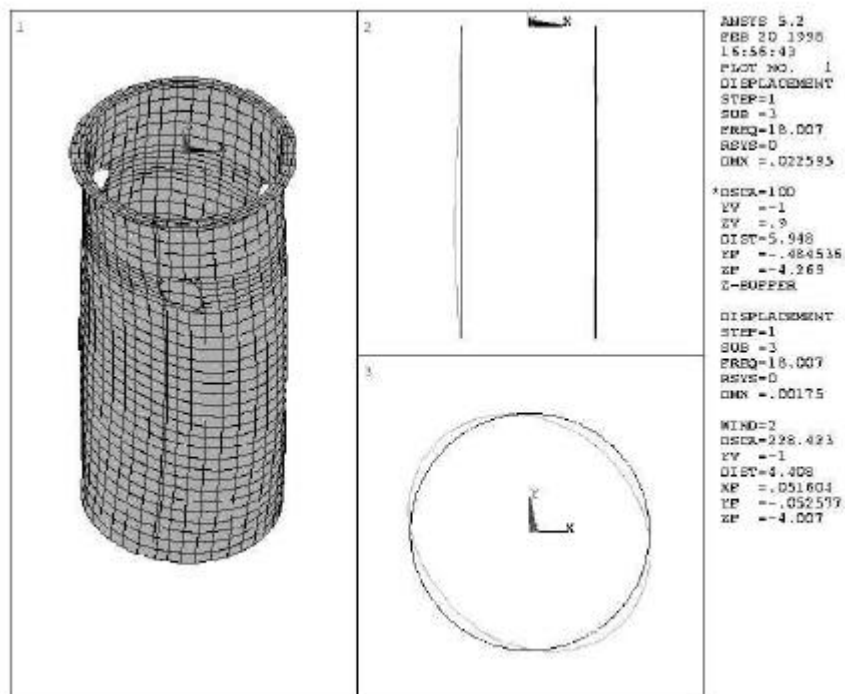


그림 3 정상상태 노심지지원통의 제 3 모드 형상(shell)

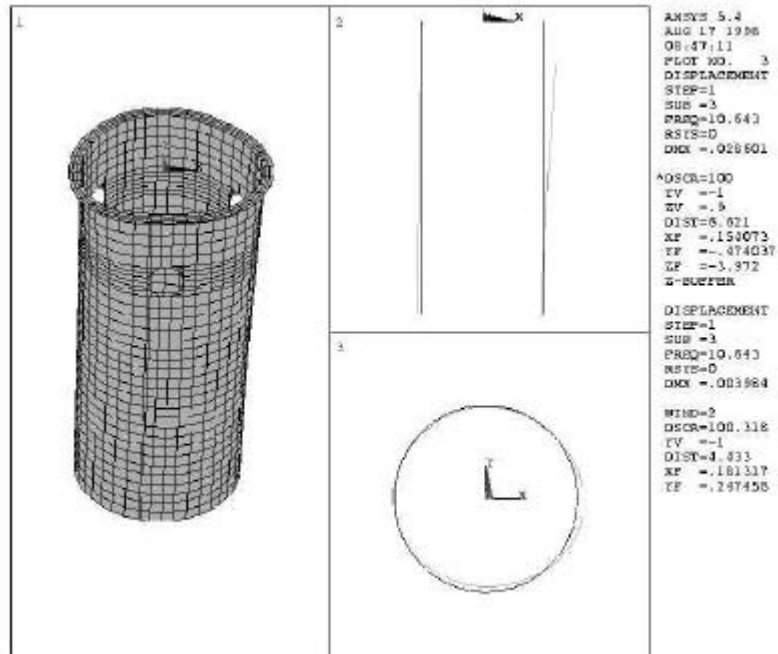


그림 4 Hold-down ring 60% 결함인 노심지지원통의 제 3 모드 형상

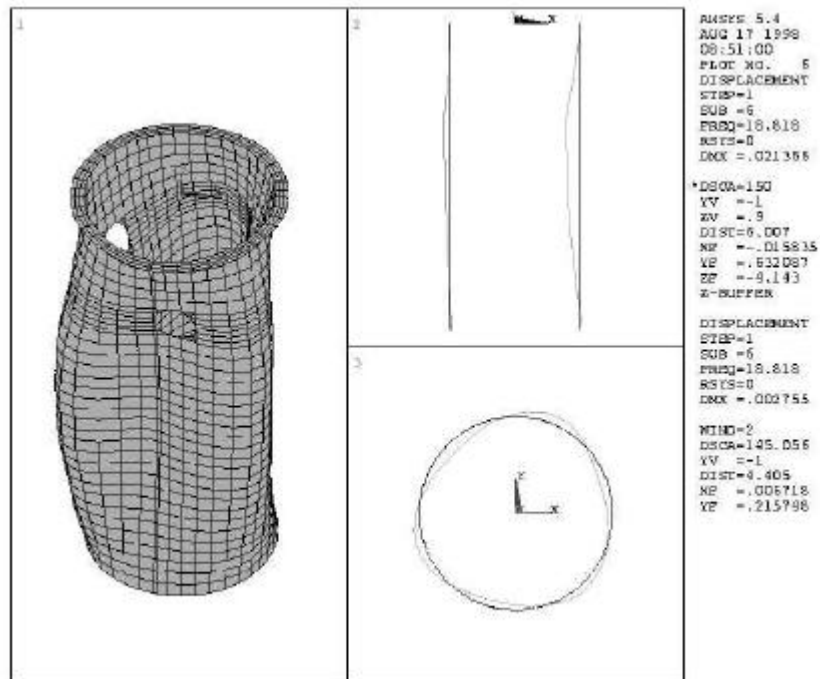


그림 5 Hold-down ring 60% 결함인 노심지지원통의 제 6 모드 형상