

'99 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 영광 3&4 호기 원자로내부구조물의 동특성 해석 및 검증

### Dynamic Characteristics of Yonggwang 3&4 Reactor Internals

박진호, 류정수, 김희령, 남호운  
한국원자력연구소  
대전시 유성구 덕진동 150  
김대룡  
전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

한국형 표준원자로인 영광 3&4 호기 원자로 내부구조물을 구조해석용 프로그램인 ANSYS 코드를 이용하여 3 차원 유한요소 모델링을 수행하였다. 원자로 내부구조물중 노심지지원통과 상부안내구조물은 기하학적 형상을 그대로 모사하여 고체요소(SHELL 63)로 모델링 하였으며, 핵연료집합체를 포함한 나머지구조물들은 질량효과만을 고려하여 단순화 하였다. 그리고 노심지지원통과 상부안내구조물사이의 유체와 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이의 유체는, 그 영향을 감안하여 별도의 유체요소(FLUID 80)로 모델링 하였으며, 나머지 유체는 노심지지원통 및 상부안내구조물 벽면에 대한 부가 질량으로 처리하였다. 상기 유한요소 모델에 대하여 자유진동 모드 해석을 수행한 결과 노심지지원통 구조물의 기본 보 모드 고유진동수가 약 8 Hz, 기본 셸 모드 고유진동수는 약 15 Hz로 나타났다. 이것은 원자로의 정상상태 가동 중에 원자로 내부구조물 진동 감시 시스템의 출력신호를 이용하여 측정한 고유진동수와 잘 일치하였다.

#### Abstract

Finite element model of the Yonggwang 3&4 reactor internals were obtained using ANSYS software package. The model has been made in order to accommodate both mass and stiffness effects of the whole structures and fluid within reactor. Namely, the core support barrel(CSB) and upper guide structure(UGS) were fully modeled using SHELL 63 element. The other structures including fuel assemblies were simplified as additional mass density to the CSB bottom. The fluids both between

the CSB and reactor vessel, and between the CSB and UGS were also completely modeled using FLUID 80 element. The other fluids inside CSB and UGS were simply regarded as axially distributed mass density on those walls. 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 Hz, the shell mode one 15 Hz. The analysis results showed in good agreement with the measured data from the plant IVMS(internal Vibration Monitoring System).

## 1. 서 론

영광 원자력 3&4 호기는 한국원자력연구소가 미국 CE사와 공동으로 설계하고 한국 전력(주)이 건설한 1000 MWe 급 4 loop 가압경수로형(PWR, Pressurized Water Reactor) 원자로이다. 영광 3&4 호기는 국내 기술진에 의하여 최초로 설계된 한국형 표준원자로로서, 울진 3,4,5,6 및 영광 5,6,7,8 호기의 원형로(proto type)가 된다. 따라서 영광 3&4 호기 원자로 내부구조물에 대한 동특성(고유진동수 및 진동모우드 형상) 데이터는 상기의 다른 원전에도 직접적으로 활용할 수 있다.

가압경수로형 원자로의 내부구조물은 일반적으로 노심을 제외한 노심지지원통(CSB, Core Support Barrel), 상부안내구조물(Upper Guide Structure), 노심올타리판구조물(Core Shroud Assembly) 및 하부지지구조물(Lower Support Structure) 등으로 구성되어 있다(그림 1 참조). 그 중에서도 노심지지원통 구조물은 원자로 내부구조물 전체의 동특성을 지배하는 주요 구조물로서, 원자로 내부를 흐르는 고온/고압의 유체 유동에 의하여 손상이 가장 많이 발생하는 곳으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 따라서 원자로 내부구조물의 구조적인 건전성을 입증하기 위해서는 동특성 파악을 위한 해석모델의 개발이 필요하다. 개발된 모델은 실제 원자로의 가동시 원자로 내부구조물의 동적응답을 예측하기 위하여 이용되며, 원자로 내부구조물의 결함을 진단/예측하기 위한 수단으로도 사용할 수 있다.

본 논문에서는 영광 3&4 호기 원자로내부구조물의 동특성 해석모델을 개발하기 위하여 3 차원 유한요소 모델링 및 자유진동 모우드 해석을 수행한다. 그리고 모우드 해석을 통하여 얻어진 동특성 해석결과를 검증하기 위하여, 원자로의 정상상태 운전시 원자로 내부구조물 진동감시시스템의 출력신호로부터 추출한 동특성 측정결과와 비교/검증한다.

## 2. 원자로 내부구조물의 유한요소 모델링

그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 원자로 내부구조물은 매우 복잡하게 조립되어 있

으므로, 내부구조물 전체를 모두 3 차원적으로 모델링 하는 것은 유한요소의 개수가 기하급수적으로 늘어나 해석자체가 불가능하게 된다. 따라서 구성요소들의 상대적인 질량 및 강성효과를 고려하여 그 효과가 크다고 예상되는 부분을 중심으로 모델링하기로 한다. 원자로내부구조물 중에서 가장 핵심적인 부분은 노심을 지지하고 있는 노심지지원통(CSB)이다. 따라서 노심지지원통을 중심으로 하여 내부유체 및 다른 구조물들의 질량 및 강성효과를 노심지지원통에 반영한다. 먼저 상부안내구조물(UGS, Upper Guide Structure)의 경우에는 노심지지원통과 동축원통 형상을 하고 있으며 작은 간격사이에 유체가 존재한다. 그러므로 전체를 질량효과만으로 처리하는 것은 너무 단순하며 노심지지원통의 고유진동수 및 진동모우드 형상에 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 상부안내원통구조물 및 원주방향의 간격유체는 모두 3차원적으로 따로 모델링한다. 노심 및 노심을타리판 구조물은 노심지지원통의 하부 끝단에 단순 지지되어 있으므로 전체의 질량효과만을 고려하여 집중질량으로 단순화 한다. 노심지지원통 및 상부안내구조물 내부의 유체는 노심지지원통 내부에서 질량효과만 있는 것으로 가정하여 노심상부구조물 내부의 벽면에 분산된 부가질량으로 단순화한다. 원자로 압력용기 및 노심지지원통 외부 사이에 있는 간격유체는 노심지지원통의 직경에 비하여 매우 작으므로 (약 1/8) 단순히 부가질량효과만으로 처리할 수가 없으므로 유체도 함께 3차원 모델링하였다. 이것은 이미 수행된 울진 1&2 호기의 원자로 내부구조물에 대한 동특성 해석 결과로부터 그 타당성이 입증되었다<sup>2)</sup>. 그리고 노심지지원통 구조물의 여러가지 접합부와 작은 구멍 및 작은 부품들은 무시하였다. 또한 노심지지원통에는 냉각수의 유출을 위해 원자로 압력용기의 출구노즐과 일치하는 구멍이 2 개가 있는데, 이 주위의 구조도 실제보다는 단순한 구조로 간략화 하였다. 즉 유한요소 모델시 완전한 원형을 모사할 수 없으므로 18각형의 원형으로 모사하였다. 노심지지원통 바닥부분(하부지지구조물)의 경우는 많은 구멍이 있으나, 이를 무시하고 구멍이 없는 완전한 바닥으로 가정한 후, 그 부분의 밀도를 낮추어 구멍으로 인한 질량감소의 효과를 고려하였다. 그리고 상부플랜지부근에서의 구조도 실제의 경우에는 round처리가 되어 있으나 모델링시에는 무시하였다.

따로 유한요소 모델링이 되지 않고서 노심지지원통에 질량효과로 작용하는 구조물 및 유체는 그 변화에 해당하는 부분을 노심지지원통의 밀도 변화로 모델링에 반영하였다. 즉 노심지지원통 내부에 설치되어 있는 노심을타리판 구조물은 그 강성은 무시하고 질량만을 노심지지원통의 벽면에 추가밀도로 적용하여 재료자체의 밀도에 부가하였다. 또한 노심지지원통의 바닥부분(하부지지구조물)은 유체가 통과할 수 있는 구멍 등 복잡한 구조를 가지고 있으나 이를 모두 무시하고 일정한 두께를 가진 판재(plate) 모양의 강체로 가정한 것이다. 따라서 그 밀도는 원래의 재질 밀도가 아닌 새롭게 계산된 밀도로 대체되었다.

위와 같은 단순화에도 불구하고 노심지지원통의 높이, 직경, 두께, 그리고 전체의 질

량, 부피 및 구멍의 크기 및 위치 등은 실제의 경우를 그대로 재현할 수 있도록 하였다.

위에서 설명된 단순화 과정을 통하여 범용구조해석 프로그램인 ANSYS 코드<sup>3)</sup>를 사용하여 원자로 내부구조물을 3 차원 유한요소로 모델링하였다. 그림 3은 원자로 내부구조물(원자로 압력용기를 제외한 구조물 및 유체) 전체의 3 차원 유한요소 모델을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 노심지지원통 및 상부안내구조물, 그리고 바닥재는 고체 요소로 모델링 하였으며 원자로 압력용기 및 노심지지원통 사이 그리고 노심지지원통과 상부안내구조물 사이의 유체는 유체 요소로 모델링하였다.

### (1) 구조물 모델

기하학적으로 단순화된 모델을 유체와의 coupling을 고려하여, 노심지지원통구조물의 경우 원주방향으로 48개의 절점, 축방향으로 56개의 절점이 생성되도록 모델링 하였으며, 상부안내구조물에 대해서는 원주방향으로 48개, 축방향으로는 37개의 절점으로 하였다. 이 절점들이 생성된 위치는 균일분포에 의한 것이 아니며, 모델링에서의 필요에 의해 설정되었다. 원형의 구멍을 모사하기 위해서는 많은 절점이 필요하므로 그 주위에는 상대적으로 많은 절점들이 설정되었다. 유체와 coupling 되는 부분에 사용된 요소의 종류는 4개의 node로 구성되는 평면에 지정된 두께를 자동으로 생성할 수 있는 3 차원 요소인 SHELL 63 고체요소이며, 노심지지원통의 바닥부분 및 상부플랜지 부분은 SOLID 45 고체요소를 사용하였다.

노심지지원통의 바닥부분 및 상부플랜지 부분을 제외한 구조물의 경우 전체적으로 3839개의 절점으로 구성된 3744개의 쉘 고체요소가 사용되었다.

### (2) 유체 모델

노심지지원통과 원자로 압력용기 사이 및 노심지지원통과 상부안내구조물 사이의 유체는 단순히 질량효과만 고려하지 않고 좁은 간격으로 인한 유체 탄성효과를 반영하기 위하여 유체요소를 이용하여 직접 3 차원적으로 모델링하였다. 이때 유체요소의 두께는 일정하다고 가정하고, 노심지지원통과 상부안내구조물 사이는 2 겹(layer)의 요소로, 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이는 4 겹으로 모사하였다. 각 layer는 동일한 두께로 설정되었으며, 모두 6면체의 유체 요소(FLUID80)를 사용하였으므로, 2겹의 요소를 생성하기 위해서 3겹의 절점 layer를 생성하였다. 유체의 모델링을 위해서는 노심지지원통과 원자로 압력용기 사이의 경우 원주방향으로 48 개의 절점, 축방향으로 53 개의 절점이 사용되었으며, 노심지지원통과 상부안내구조물 사이의 경우에는 원주방향으로 48 개의 절점, 축방향으로 37개의 절점이 사용되었다.

특히 유체요소의 절점의 생성에서 유의하여야 할 점은 고체요소와 coupling 등의 관계 설정이 용이한 위치에 유체 절점을 설정하여야 하고 셀 요소를 이용하는 노심지지 원통의 두께를 고려하여 유체 절점을 설정하여야 한다는 점이다. 즉, 셀 형태의 고체요소는 절점의 위치가 셀의 중립축에 설정되므로 셀 두께의 절반만큼 유체요소가 커지는 것을 방지하기 위해서 고체요소와 유체요소내의 대응되는 절점 사이의 좌표에 차이가 있도록 하였다.

유체의 움직임은 반경방향에서 노심지지원통 벽면의 움직임과 일치하여야 하므로, 이를 모사하기 위해 벽면의 절점과 유체의 절점을 반경방향으로 coupling하였다. 그리고 원주방향과 축방향으로는 유체와 고체 요소사이에 미끄러짐이 일어날 수 있도록 하였다.

전체적으로 유체모델링을 위해서는 총 17270 개의 절점으로 구성된, 12864 개의 유체요소가 사용되었다.

### (3) 경계조건

우선 유체의 바깥쪽 layer의 모든 방향 자유도를 구속한다. 이것은 모델링에 포함되지는 않았지만, 유체의 바깥쪽에는 원자로 압력용기가 있기 때문이다. 원자로 압력용기는 노심지지원통에 비하여 대단히 크고 무거우므로 움직임이 없는 것으로 가정한다. 노심지지원통의 플랜지 부분에서는, 가장 바깥쪽의 원을 따라 설정된 절점들은 모든 자유도를 구속하고, hold down ring에 접촉하게 되는 면(원형의 띠 모양)에 위치한 절점들의 경우에는 축방향의 자유도만을 구속하였다. 그리고 노심지지원통 하부의 바닥재는 질량효과만을 나타내기 위하여 노심지지원통과 반경방향으로만 coupling 하였다.

## 3. 유한요소해석 결과

유한요소모델에 대한 자유진동 모드 해석을 수행한 결과가 표 1에 나와 있다. 여기서 m 은 보 모드(beam mode) 수를 나타내며, n 은 셀 모드(shell mode) 수를 나타낸다. 즉, 노심지지원통 구조물은 직경에 비하여 두께가 매우 작으므로(두께/직경=0.02) 전형적인 원통형 셀 구조물이다. 따라서 보 및 셀 모드가 서로 coupling 되어 나타나게 된다.

표 1에서 mode 1과 mode 2는 같은 진동 모드(기본 보 모드, 약 8 Hz)로서 서로 수평방향으로 직각이며, 관련 진동 모드 형상이 그림 3 및 그림 4에 각각 나와 있다. 또 mode 3과 mode 4 역시 같은 진동 모드로서 기본 셀 모드이다(그림 5 및 그림 6 참조, 약 15 Hz). 이와 같이 동일한 진동 모드가 방향에 따라 진동수가 약간 차이가 나는 것은 노심지지원통이 완전한 축 대칭이 아니기 때문이다. 그림 7 및 그림

8은 보 모드수가 2 차 이면서 셸 모드도 2 차( $m=2, n=3$ )인 경우이다. 주파수가 높아질수록 일반적인 셸 원통구조물의 경우처럼 보 및 셸 모드 형상이 다양하게 나타남을 볼 수가 있다. 그러나 주파수가 증가할수록 모드의 밀도(modal density)가 높아져 유한요소해석 결과의 오차가 증가하므로, 고차의 진동 모드 해석이 필요할 경우에는 유한요소의 개수를 더 증가하여야 하며, 경계조건의 적용도 보다 상세하게 해야 한다. 그러나 대형 구조물의 경우에는 주로 저차 모드가 전체 거동을 지배하므로 약 30 Hz 이후의 결과는 실제적으로 활용하기는 어려울 것으로 판단된다.

#### 4. 동특성 해석결과 검증

유한요소 해석을 통하여 구한 동특성 모델의 타당성을 검증하기 위하여 영광 4 호기에 설치되어 있는 원자로 내부구조물 진동감시 시스템(IVMS, Internal Vibration Monitoring System)의 신호를 이용하였다. IVMS 시스템은 원자로 압력용기 외부에 설치되어 있는 노외중성자 신호의 잡음해석을 통하여 노심지지원통(CSB, Core Support Barrel)의 고유진동수 변화를 감시한다<sup>4)</sup>. 그림 9는 영광 3&4 호기에 설치되어 있는 노외중성자 신호 검출기의 측정점을 보여준다. 한국원자력연구소에서는 동일 평면상의 4 개의 노외중성자 잡음신호(상, 중, 하 각각 4개씩)를 동시에 실시간으로 측정, 분석함으로써 노심지지원통 구조물의 기본 보 모드 및 기본 셸 모드를 측정할 수 있는 모드 분리 알고리즘을 개발하여 현장에 적용하였다<sup>5)</sup>. 그림 10은 노심의 상부 평면 및 중간 평면 위치에서 측정한 노외중성자 신호군(각 4 개)으로부터 모드 분리 알고리즘을 적용한 결과를 보여준다. 여기서 기본 보 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 앞에서 구한 3 차원 유한요소 모델이 원자로 내부구조물의 동적해석 모델로 타당함을 알 수가 있다.

### 3. 결 론

한국형 표준원자로인 영광 3&4 호기 원자로 내부구조물에 대한 3 차원 유한요소 모델링을 통하여 원자로 내부구조물의 동특성 해석을 수행한 결과 노심지지원통 구조물의 기본 보 모드 진동주파수가 약 8 Hz, 기본 셸 모드 진동주파수는 약 15 Hz 인 것으로 나타났다. 이 결과는 원자로의 정상상태 가동 시에 원자로 내부구조물 진동감시시스템의 출력신호를 이용하여 추출한 고유진동수 결과와 잘 일치하였다.

**[감사의 글]**

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] Nuclear Power Experience, Vol. PWR-2II, Reactor Internals
- [2] 정승호, 박진석, 김태룡, "기계적 결합이 있는 원자로 내부구조물의 유한요소 해석," 대한기계학회논문집(A) 제 21권 제 8 호, pp. 1270-1275, 1997
- [3] Swanson Analysis System Inc., ANSYS user's manual(Ver. 5.4), 1996
- [4] 윤원영, 고병준, 박인용, 노희천, "Neutron Noise Analysis for PWR Core Motion Monitoring," J. of KNS, 한국원자력학회, Vol 20, No.4, pp. 253-264, 1988
- [5] 박진호외 7인, "원자로 잡음을 이용한 결합진단 기술개발," KAERI/RR-1908/98, 한국원자력연구소

**표 1 영광 3&4 호기 노심지지원통 구조물의 고유진동수 해석결과**

모우드 번호	보 모드 수 (m)	열 모드 수 (n)	고유진동수 (Hz)
1	1	1	7.84
2	1	1	7.98
3	2	2	14.57
4	2	2	14.90
5	2	1	16.41
6	2	1	16.43
7	2	3	17.05
8	2	3	17.19
9	2	4	24.11
10	2	4	24.39
11	2	4	24.92
12	2	2	25.94
13	3	3	27.31
14	3	3	27.49

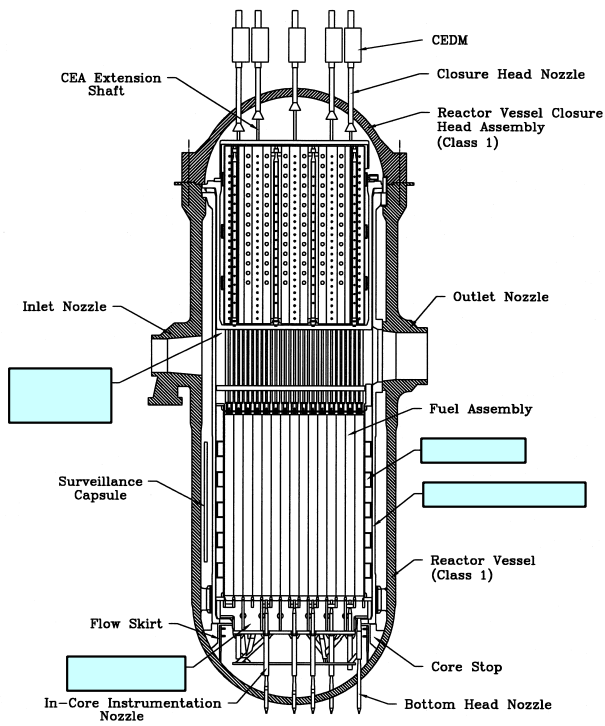


그림 1 영광 3&4 호기 원자로 내부구조물 단면도

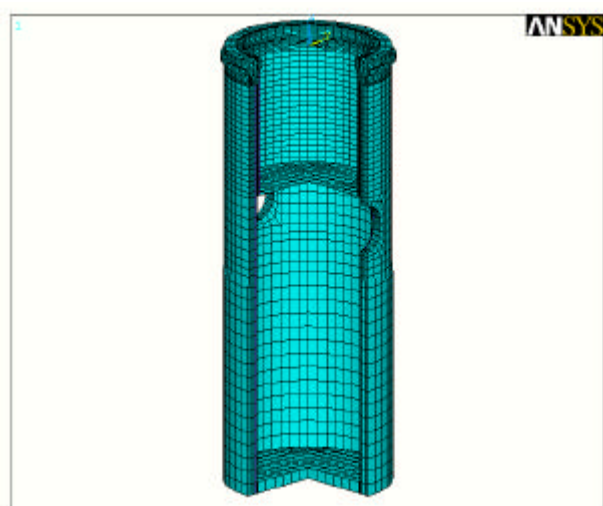


그림 2 원자로 내부구조물 3 차원 유한요소 모델(구조물+유체)



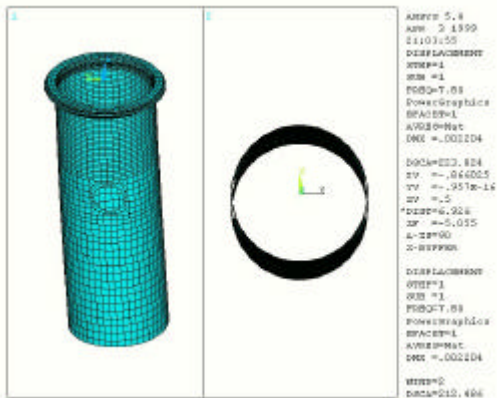


그림 3 노심지지원통의 포우드 형상, mode 1  
(n=1, n=1)

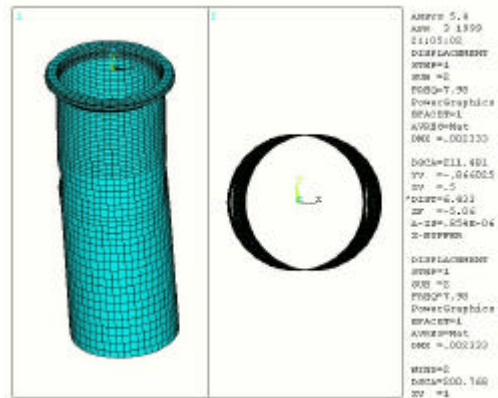


그림 4 노심지지원통의 포우드 형상, mode 2  
(n=1, n=1)

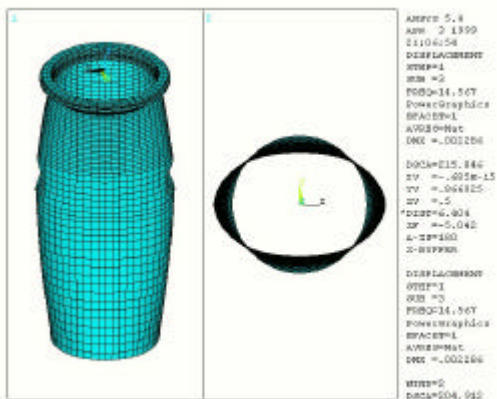


그림 5 노심지지원통의 포우드 형상, mode 3  
(n=2, n=2)

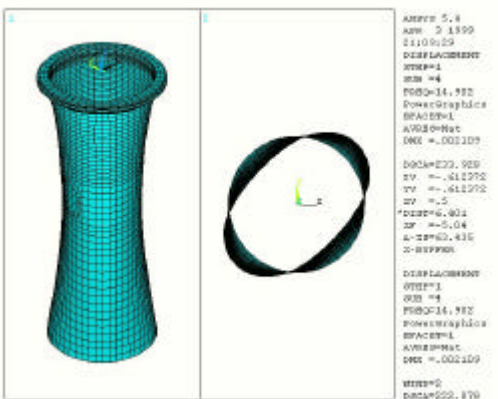


그림 6 노심지지원통의 포우드 형상, mode 4  
(n=2, n=2)

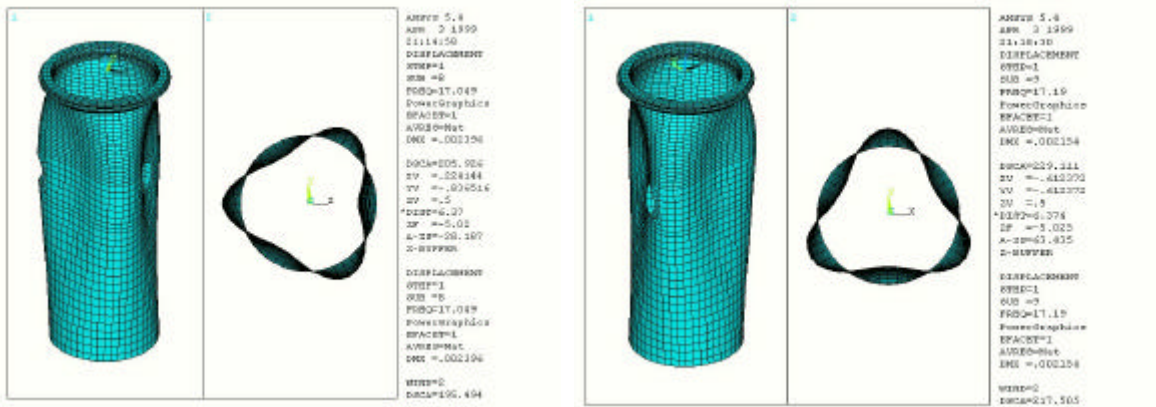


그림 7 노심지지원통의 포워드 형상, node 7 (n=2, n=3)      그림 B 노심지지원통의 포워드 형상, node B (n=2, n=3)

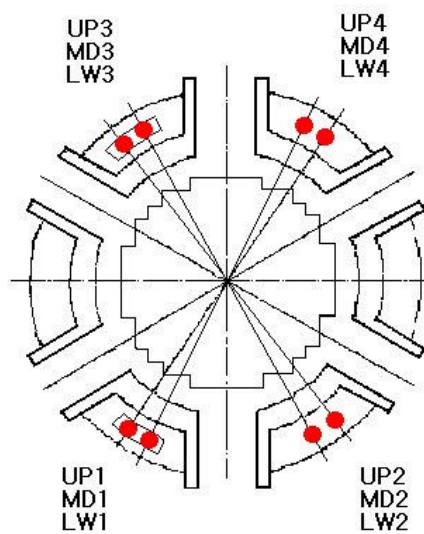
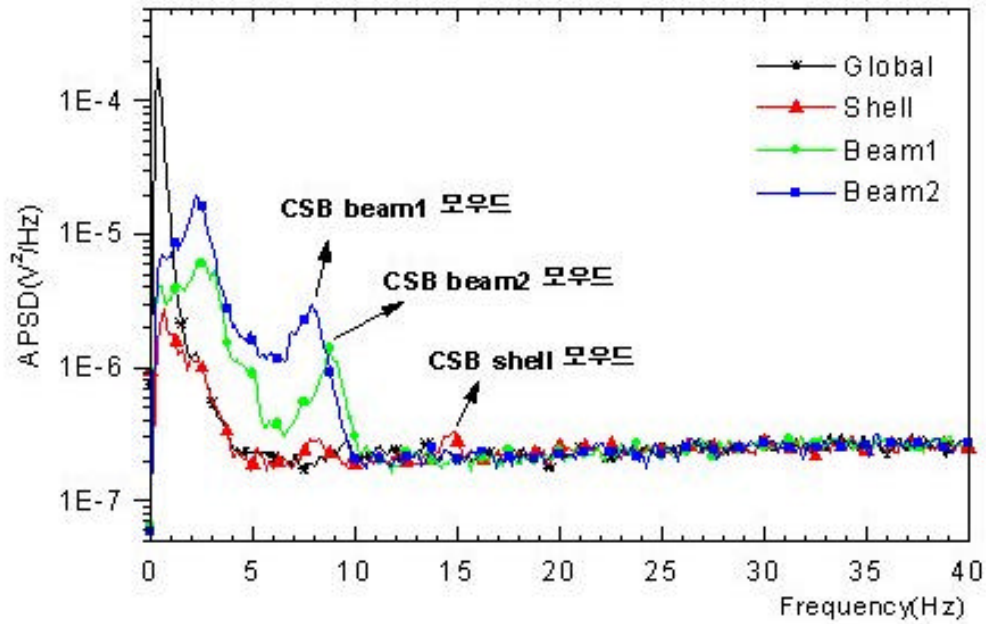


그림 B 영광 3RR 호기의 노외중성자 센서 위치 (UP:노심상부, MD:노심중심부, LW:노심하부)

영 광 4호 기 Middle Channel



영 광4호 기 Upper Channel

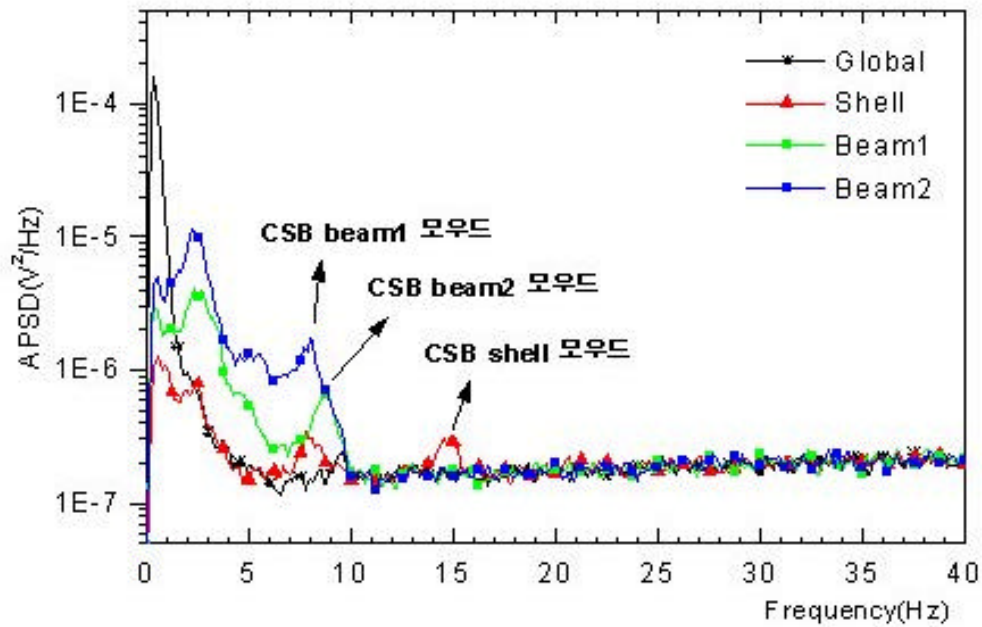


그림 10 노외중성자 잡음신호를 이용한 노심지지원통의 고유진동 모드 측정 결과