

원자로 노심으로 인한 노심지지동체의 동특성 변화에 관한 연구

강형선*, 반재삼, 나상남(전남대 대학원 기계공학과), 조규종(전남대 기계시스템공학부)

The Effect of the reactor core to the dynamic characteristic of core support barrel

H. S. Kang, J. S. Ban, S. N. Na(Mech. Eng. Dept., CNU), K. Z. Cho(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

The Core Support Barrel (CSB) is a major component of Reactor Internals, and is designed to support and protect the Reactor Core. In this study, Reactor Core, Core Shroud and CSB were simplified to coaxial cylinders and then the effect of Reactor Core & Core Shroud to the dynamic characteristic of CSB was analyzed. For the beam modes, natural frequencies of the cantilevered cylinder are compared with those of the cantilever beam. And it was found out that shear modulus must be used correctly to convert the shell model to the equivalent beam model. From the dynamic characteristics of the beam model, it was found out that natural frequencies are proportional to the length of Reactor Core & Core Shroud and inversely proportional to the mass. From the comparison with the dynamic characteristics of a beam model and a lumped-mass model it was found out that the size of lumped-mass must be determined considering both the length and the mass of Reactor Core & Core Shroud.

Key Words : Core Support Barre(노심지지동체), reactor core(노심), core shroud(노심 보호벽), shear modulus(전단계수)

1. 서론

노심지지동체(Core Support Barrel, CSB)는 다양한 하중 작용시에도 원자로 노심(Reactor Core) 및 노심 보호벽(Core Shroud)을 지지 및 보호하는 원자로 내부구조물의 핵심부품이다. 노심지지동체가 원자로 노심 및 노심 보호벽과 함께 자유 진동할 때, 고유진동수를 구하는 것은 그 형상이 복잡하여 정확한 값을 구하기가 어렵다. 울진 3,4호기의 경우, 원자로 노심과 노심보호벽의 질량은 각각 254,237 lbs와 40,780 lbs로써 노심지지동체의 질량 157,440 lbs보다 1.874배나 큰 질량을 갖고 있다.⁽¹⁻²⁾ 노심지지동체의 2배 가량 무거운 질량이 노심지지동체의 하부 플랜지에 작용하고 있기 때문에, 원자로 내부구조물이 수평 진동할 때 원자로 노심과 노심 보호벽은 노심지지동체의 동특성 변화에 매우 큰 영향을 주게 된다. 본 논문은 원자로 노심과 노심 보호벽 그리고 노심지지동체를 원통형 웰로 단순화하여, 이 구조물이 수평진동을 할 때 원자로 노심과 노심 보호벽이 노심지지동체의 동특성에 미치는 영향을 해석하고, 웰모델과 빔모델의 고유진동수가 서로 일치하도록 전단계수를 사용하

여 웰모델을 등가인 빔으로 모델링하여, 빔모델과 집중질량모델의 고유진동수가 일치하는 집중질량의 크기를 정량적으로 구하였다. 또한 원자로 노심과 노심 보호벽의 질량이 노심지지동체의 하부 플랜지에 집중질량으로 작용하는 집중질량모델에서 구조물의 동특성이 변하지 않는 집중질량의 크기를 정량적으로 구하였다.

2. 이론적 해석

본 연구의 대상인 노심지지동체의 형상을 그림 1에 나타내었다. 그림 2(a)와 같이 강체로 연결되어 있는 두 개의 빔은 그림 2(b)의 등가질량과 등가강성계수를 갖는 2 자유도의 집중질량모델로 나타낼 수 있다. 그림 2(a)에서 M₁, L₁과 M₂, L₂는 빔 1과 빔 2의 질량과 길이를 각각 나타내고, M_{1eq}와 K_{1eq}는 빔 1에 대한 등가질량과 등가강성계수이고, M_{2eq}와 K_{2eq}는 빔 2에 대한 등가질량과 등가강성계수를 나타내고 있다. w₁(x₁, t)와 w₂(x₂, t)는 빔 1과 빔 2의 변위를 나타내고, y₁(t)와 y₂(t)는 등가질량의 변위를 각각 나타내 주고 있다. x₁과 x₂는 고정점과 강체로부터의 거리를, t는 시간을 각각 나타낸다. 그림 3은 그림 2(b)의 등가질량이 자유 진동할 때 등가

질량에 작용하는 힘을 나타내 주고 있다. 힘의 평형 조건으로부터 아래와 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$M_{1eq}\ddot{y}_1 + K_{1eq}y_1 + K_{2eq}(y_1 - y_2) = 0$$

$$M_{2eq}\ddot{y}_2 + K_{2eq}(y_2 - y_1) = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

(1)식은 다음과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{1eq} & 0 \\ 0 & M_{2eq} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2)식에 대한 특성방정식은 다음식과 같다.

$$\begin{vmatrix} K_{1eq} + K_{2eq} - \omega^2 M_{1eq} & -K_{2eq} \\ -K_{2eq} & K_{2eq} - \omega^2 M_{2eq} \end{vmatrix} = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3)식을 정리하면 다음과 같은 방정식이 된다.

$$M_{1eq}M_{2eq} - (K_{1eq}M_{1eq} + (K_{1eq} + K_{2eq})M_{2eq})\omega^2 + K_{1eq}K_{2eq} = 0 \quad \dots \dots \dots (4)$$

(4)식을 ω^2 에 대하여 풀면 다음과 같다

$$\omega^2 = \frac{\{(K_{1eq} + K_{2eq})M_{2eq} + K_{2eq}M_{1eq}\} \pm \sqrt{\{(K_{1eq} + K_{2eq})M_{2eq} + K_{2eq}M_{1eq}\}^2 - 4M_{1eq}M_{2eq}K_{1eq}K_{2eq}}}{2M_{1eq}M_{2eq}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

(5)식에서

$$\frac{K_{1eq}}{M_{1eq}} = \omega_1^2, \quad \frac{K_{2eq}}{M_{2eq}} = \omega_2^2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{K_{2eq}}{M_{1eq}} = \frac{K_{2eq}}{M_{2eq}} \frac{M_{2eq}}{M_{1eq}} = \omega_2^2 \frac{M_{2eq}}{M_{1eq}}$$

로 나타내면, 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega^2 = \frac{1}{2} \left[\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_2^2 \frac{M_{2eq}}{M_{1eq}} \right]$$

$$= \sqrt{\left\{ \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_2^2 \frac{M_{2eq}}{M_{1eq}^2} \right\} - 4\omega_1^2\omega_2^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

(7)식은 그림 2(b)의 집중질량모델에 대한 고유진동수이다. (7)식에서 두 개의 빔이 연결된 시스템의 고유진동수는 각 빔의 고유진동수 ω_1 , ω_2 와 등가질량 M_{1eq} , M_{2eq} 에 따라 변함을 알 수 있다.

노심지지동체의 동특성을 해석할 때, 현행 설계해석에서는 원자로 노심과 노심 보호벽 질량에 의한 영향만을 고려한 집중질량모델을 사용했으나, (7)식의 결과로부터 질량뿐만 아니라 길이도 함께 고려해야 된다는 것을 알 수 있다.

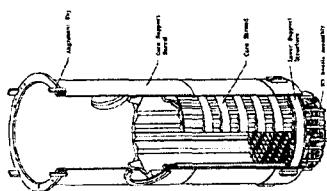
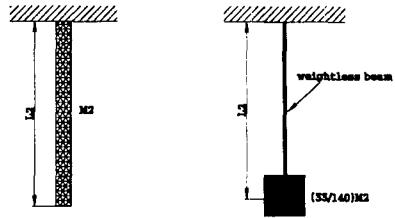


그림 1. 노심 지지동체(CSB)



(a)Beam Model (b)Equivalent Mass-Spring Model
그림 2. 빔모델과 2 자유도를 갖는 집중질량모델

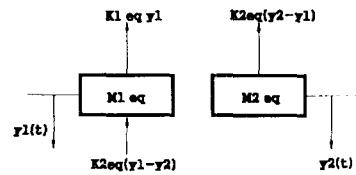


그림 3. 집중질량모델의 자유물체도

2. FEM 해석

2.1 해석모델

해석 모델은 쉘 모델, 빔모델, 집중질량 모델등 3가지 형태로 모델링하여 각각의 경우에 대한 고유진동수와 모드 형상을 유한요소 해석프로그램인 ANSYS⁽³⁾를 사용하여 해석하였다. 쉘 모델의 경우, 3종류의 구조물을 8개의 절점(node)을 갖는 SHELL 93 요소를 사용하여 원통형 실린더 형태로 모델링하였고, 빔 모델의 경우는 평면운동과 축방향에 대한 회전운동을 갖는 3 자유도의 BEAM3 요소를 사용하여 모델링하였다. 집중질량모델은 회전하지 않고 질량만 갖고 있는 3 자유도의 MASS 21 요소를 사용하였다. 각 요소에 사용된 물성치는 모두 등가로 계산하여 적용하였고, 빔모델의 단면적과 단면 관성모멘트는 원통형 실린더의 형상으로부터 구했다. 표1은 빔모델에 사용된 단면적과 단면 관성모멘트이다.

표 1. 빔모델에 사용된 단면적과 단면 관성모멘트

	Outer cylinder	Inner cylinder
Area	1329 in ²	1225 in ²
Area moment of inertia	3303962 in ⁴	2589658 in ⁴

2.2 경계조건

그림 4에서 1은 상단이 고정되어 있는 바깥쪽 실

린더이고, 2는 강체로 바깥쪽 실린더와 연결되어 있는 안쪽 실린더, 3은 강체 그리고 4는 전체의 모델을 보여 주고 있다. 강체는 실린더와 같은 요소인 SHELL 93 요소를 사용했으며, 강체의 탄성계수는 $30E12 \text{ lb/in}^2$, 질량밀도는 $7.5E-4 \text{ lb sec}^2/\text{in}$ 을 사용하였다. 실린더의 탄성계수는 $30E6 \text{ lb/in}^2$ 이다. 원자로 노심과 노심 보호벽의 길이와 질량 변화에 대한 노심지지동체의 동특성 변화를 알아보기 위하여 안쪽 실린더의 길이를 0에서 383"까지 변화시켰다. 여기서 383"는 바깥쪽 실린더인 노심지지동체의 길이를 나타낸다.

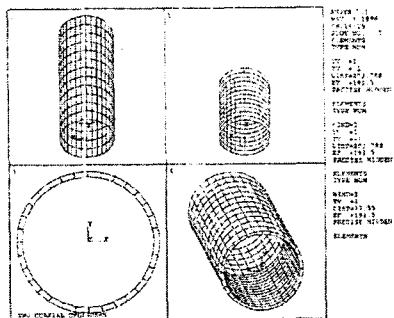


그림 4. SHELL 93 요소를 사용한 셀모델

3. 해석결과

3.1 외팔실린더와 외팔보의 동특성 비교

표 2에는 외팔실린더의 빔모드와 셀모드에 대한 고유진동수를 나타내 주고 있으며, 빔모드에 대한 1차 및 2차 고유진동수는 31.353 Hz 와 115.60 Hz 임을 알 수 있다. 표 2에서 190 Hz 이내의 고유진동수만 구했기 때문에 $N=3$, $M=1$ 인 고유진동수는 나타나지 않았다. 그러나 표 3의 결과로부터 3차 고유진동수는 약 240 Hz 범위에 있음을 예측할 수 있다.

표 3은 외팔보에서 전단계수의 차이에 대한 고유진동수의 변화를 보여주고 있다. 표 2와 표 3의 결과를 비교해보면, 전단계수 값이 1.9374 일 때 외팔보와 외팔실린더의 빔모드에 대한 1차 및 2차 고유진동수는 빔에선 31.353 Hz 와 115.35 Hz 그리고 실린더에선 31.353 Hz 와 115.60 Hz 로써 두 모델에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 반경이 $40"$ 인 셀모델에서도 전단계수가 1.9374 일 때 빔모드에 대한 1차 고유진동수는 셀모델과 빔모델에서 각각 20.154 Hz 와 20.153 Hz 로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 본 해석결과에서 알 수 있듯이 1.9374 의 전단계수값은 일반적으로 원통형 실린더를 빔으로 모델링 할 때 사용하는 전단계수 값인 $1.8868 (=1/0.53)$ 과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 본 해석결과의

전단계수(1.9374)가 일반적으로 사용되는 값인 1.8868 과 차이가 있는 것은 ANSYS 코드를 사용하여 실린더를 모델링 할 때 실린더의 단면을 완전한 원형으로 만들 수 없는데서 발생하는 차이이다.

이상의 결과로부터 본 논문에선 셀모델을 등가인 빔으로 모델링 할 때 1.9374 의 전단계수를 사용하였고, 빔모델과 집중질량모델의 빔에 사용하여 빔의 동특성을 해석하였다.

표 2. 외팔실린더의 빔모드와 셀모드에 대한 고유진동수

(N,M)	Freq. (Hz)	(N,M)	Freq. (Hz)	(N,M)	Freq. (Hz)
(1,1)	31.353	(1,2)	19.558	(1,3)	44.572
(2,1)	115.60	(2,2)	60.576	(2,3)	56.994
(3,1)	*	(3,2)	131.57	(3,3)	93.672

N : axial mode number, M : circumferential mode number

표 3. 전단계수에 따른 외팔보의 고유진동수

Shear Modulus	N=1	N=2	N=3	N=4
0	36.426	190.75	442.34	718.19
1.9374	31.353	115.35	238.95	315.96

N : axial mode number (units : Hz)

3.2 셀모델과 빔모델의 동특성 비교

셀모델과 등가인 빔모델을 만들기 위하여 앞에서 구한 1.9374 의 전단계수 적용하여 표 4과 같이 빔모드에 대한 셀모델과 빔모델의 고유진동수 계산하였다. 전단계수가 1.9374 일 때 빔모드에 대한 1차 고유진동수가 원자로 노심과 노심 보호벽의 길이 변화에 관계없이 두 모델에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 셀을 빔으로 모델링하여 빔모델로부터 셀에 대한 동특성을 해석할 수 있다.

표 4. 셀모델과 빔모델의 빔모드에 대한 1차 고유진동수 (* Shear modulus= 1.9374)

L2/L1	Shell model	Beam model *
1.0	19.775	19.818
0.8	21.225	21.289
0.6	22.041	22.102
0.4	23.211	23.276
0.2	25.541	25.623
0.0	31.353	31.353

L1 : Length of outer cylinder

L2 : Length of inner cylinder(units:Hz)

3.3 자유보의 길이와 질량 변화에 따른 빔모델의 동특성

외팔보에 연결되어 있는 자유보의 길이와 질량

변화에 따른 빔모델의 고유진동수 변화에 대하여 알아보았다. 표 5는 자유보의 길이(L2)는 일정하게 하고 자유보의 질량(M2)만 50 lbm에서 2,000 lbm 까지 변화시키면서 고유진동수를 구한 것이고, 표 8은 자유보의 질량은 일정하게 하고 자유보의 길이만 0.1L1에서 0.9L1까지 변화시키면서 고유진동수를 구한 것이다. 표 5에서 길이가 일정할 때 질량이 증가함에 따라 고유진동수는 감소하고, 표 6에서 질량이 일정할 때 길이가 증가함에 따라 고유진동수도 증가하는 것을 알 수 있다. 질량이 일정할 때 길이가 증가함에 따라 고유진동수가 증가하는 것은, 자유보를 집중질량으로 모델링할 때 자유보의 길이가 길수록 집중질량의 크기는 줄어든다는 것을 보여주고 있다.

표 5. 빔모델에서 자유보의 질량과 고유진동수와의 관계, L2=일정(units : Hz)

M2(lbm)	L2/L1 = 0.3	L2/L1 = 0.5	L2/L1 = 0.7	L2/L1 = 0.9
50	27.381	28.090	28.696	29.194
100	24.480	25.500	26.396	27.166
300	18.150	19.381	20.437	21.141
500	15.049	16.200	17.135	17.464
700	13.131	14.190	15.013	15.114
1000	11.267	12.212	12.913	12.845
1500	9.3887	10.201	10.775	10.602
2000	8.2164	8.9386	9.4336	9.2277

L1 : Length of beam 1, L2 : Length of beam 2

M2 : Total mass of beam 2

표 6. 빔모델에서 자유보의 길이와 고유진동수와의 관계, M2=일정 (units : Hz)

M2 / L2 / L1	100	300	500	700	1000	2000
1.0	27.506	21.097	16.966	14.491	12.200	8.6785
0.9	27.166	21.141	17.464	15.114	12.845	9.2277
0.7	26.396	20.437	17.135	15.013	12.913	9.4336
0.5	25.500	19.381	16.200	14.190	12.212	8.9386
0.3	24.480	18.150	15.049	13.131	11.267	8.2164
0.1	23.352	16.830	13.818	11.998	10.252	7.4385

3.4 빔모델과 집중질량모델의 동특성 비교

그림 5의 결과로부터, 자유보의 질량이 일정할 때 자유보의 길이가 0에서 0.4L1까지는 집중질량의 크기는 자유보의 질량에 관계없이 대체로 선형적으로 감소한다. 즉, 자유보의 길이가 짧은 구간에서는 집중질량의 크기는 자유보의 길이에 관계하고 질량변화에는 거의 일정하다. 자유보의 질량이 100 lbm (외팔보 질량 380.671 lbm의 26%)이하이고 길이가 0에서 L1까지 변할 때 집중질량의 크기는 대체로 선형적으로 감소한다. 자유보의 질량이 증가 할 수록 자유보의 길이에 대한 집중질량의 크기는 비

선형적으로 변한다. 즉, 자유보의 길이가 0.4L1이 상일 경우에 집중질량의 크기는 길이와 질량에 따라 변한다. 또한, 자유보의 질량이 증가함에 따라 집중질량이 최소가 되는 자유보의 길이는 0.8L1에 근접한다. 위와 같은 결과로부터 원자로 내부구조물이 수평진동을 할 때 원자로 노심과 노심 보호벽이 노심지지동체의 동특성에 미치는 영향을 집중질량모델로 해석 할 경유에는 원자로 노심과 노심보호벽의 길이와 질량을 고려하여 집중질량의 크기를 정해야 함을 알 수 있다.

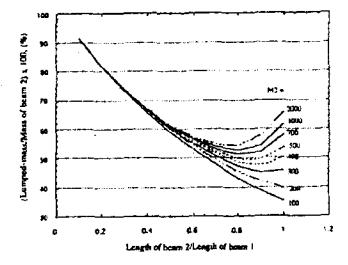


그림 5. 빔모델과 집중질량모델의 1차 고유진동수가 일치하는 집중질량의 크기

3. 결 론

- 자유보의 길이가 짧은 빔모델을 집중질량모델로 해석 할 경우에 집중질량의 크기는 자유보의 길이에만 의존한다.
- 자유보의 길이가 0.4L1 이상일 경우에 집중질량의 크기는 자유보의 길이와 질량을 함께 고려해야 한다.
- 자유보의 질량이 클 경우에는 자유보의 길이가 대체로 외팔보 길이의 0.8일 때 집중질량의 크기가 최소가 된다.
- 셀의 동특성은 전단계수를 사용하여 빔으로 해석 할 수 있고, 빔모델은 집중 질량모델로 해석 할 수 있다. 이 때 집중질량의 크기는 빔의 길이와 질량에 따라서 변한다.

참고문헌

- N0291-ME-CA240-11 Rev.01, "UCN 3 and 4 CSB In-Air and In-Water Frequencies and Mode Shapes", H.N.Rhee, 1994.
- N0291-ME-CA240 -20,Rev.04, 'UCN 3 and 4 CSB Response due to Random Pressure fluctuation Loading", T.H.Kim, 1994.
- ANSYS User's Manual for Revision 5.1 Swanson Analysis Systems, Inc.,1994.