'02 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형 상하단고정체를 갖는 한국 표준형 핵연료집합체의 진동특성

Vibration Characteristics of the KSNP Fuel Assembly with Newly Developed Top and Bottom End Pieces.

김형구, 박남규, 이성기, 서정민, 이준노, 김재원

한전원자력연료㈜ 설계기술원
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

핵연료집합체는 노내 냉각수 유동에 의한 유체유발 진동, 냉각수 펌프의 기동에 따른 진동 및 지진 및 냉각재 상실사고시의 집합체 강제진동 등 다양한 가진원에 노출되어 있으며, 이러한 외부 가진에 대해서 집합체가 그 기계적 건전성을 유지하기 위해서는 집합체의 진동특성을 면밀히 파악하여 이를 설계에 반영하여야 한다. 본 연구에서는 핵연료집합체를 원자로 경계조건을 갖는 단순한 보로 모델링하고, 이를 이용하여 신형상하단 고정체를 한국 표준형 핵연료집합체에 사용할 경우 핵연료집합체의 진동특성에 미치는 영향을 Fourier **급수를 이용하여 유도한 주파수 방정식을 이용하여 평가하였다. 본 연구에서 개발한 신형 상하단고정체를 한국 표준형 핵연료에 적용할 경우 핵연료 경계조건의 변화로 인하여 핵연료집합체의 고유 진동수가 조금 낮아지는 효과가 있으나 그 양은 미미할 것으로 평가되었다.**

Abstract

Nuclear fuel assembly is exposed to various exciting sources such as fluid induced vibration, circulating pump, earthquake, and loss of coolant accident. To maintain its integrity under these vibratory circumstances, vibration characteristics of fuel assembly should be thoroughly understood, and should be well reflected into fuel assembly design. In this study, the fuel assembly for Korea Standard Nuclear Plants (KSNP) is modeled as a uniform beam with reactor end condition and, based on the model, the vibration characteristics of the fuel assemblies with not only conventional upper and lower end fittings but also newly developed

ones are evaluated by using the frequency equation which was derived by Fourier Sine series. In the case of introducing newly developed upper and lower end fittings to the fuel assembly for KSNP, it is expected that natural frequency of the fuel assembly be lowered a little due to the boundary condition change, but the difference is negligible.

1. 서론

핵연료집합체는 노내 냉각수 유동에 의한 유체유발 진동, 냉각수 펌프 기동에 따른 진동 및 지진 및 냉각재 상실사고시의 강제진동 등 다양한 가진원에 노출되어 있으며, 이러한 외부 가진에 대해서 핵연료집합체가 기계적 건전성을 유지하기 위해서는 집합체의 진동특성을 면밀히 파악하여 이를 설계에 반영하여야 한다. 그런데, 이 핵연료집합체는 많은 핵연료 부품으로 이루어져 있으므로 그 진동 특성이 매우 복잡하고, 핵연료 구성품들의 기계 구조적 특성에 따라 직간접적 영향을 받게 되므로 핵연료 부품이 개발되거나 설계 변경이 이루어질 경우, 대부분의 경우 실험에 의존하여 그 진동 특성을 파악하여 왔다. 특히, 핵연료집합체는 원자로 내부 구조물의 상부노심 지지판과 상단고정체, 하부노심지지판과 하단고정체의 간섭에 의해 지지되고 있는데, 이러한 지지조건은 실험과 해석을 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 즉, 핵연료집합체의 지지조건은 횡방향 변위 및 회전자유도가 구속되면 양단 고정된 구조물로 모사될 수 있고, 그렇지 않고 횡방향 변위자유도만 구속된다면 단순 지지되는 구조물로 모사될 수 있을 것이다. 그러나, 실제로 한국 표준형 핵연료집합체는 일정한 회전스프링 상수를 갖는 원자로 양단조건이라는 특이한 지지조건을 나타내는 것으로 간주되어 실험에 있어서도 이를 모사하기 위하여 특수한 치구를 사용하고 있다.

최근 한전원자력연료 설계기술원에서는 과기부 과제의 일환으로 고유 모델의 신형 상하단고정체를 개발하여 이에 대한 기계/수력적 해석 및 실험을 수행하고 있는데, 본 연구에서는 개발된 신형상하단 고정체를 한국 표준형 핵연료집합체에 사용할 경우, 이로 인한 핵연료집합체의 경계조건 변화를 파악하고, 이 경계조건의 변화가 핵연료집합체의 진동특성에 미치는 영향을 Fourier 급수를 이용하여 유도한 주파수 방정식을 이용하여 평가하였다. 먼저, 이를 위하여 핵연료집합체를 양단에 병진스프링과 회전스프링이 복합적으로 작용하여 탄성 지지되는 보 구조물로 모사하였다. 그리고, 지지 조건의 영향을 평가하기 위하여 각 지지 스프링의 특성을 변화시켜 스프링 상수 변화에 따른 진동수 변화를 평가하였으며, 원자로 양단조건을 적용한 한국 표준형 핵연료집합체의 진동특성을 평가하고 그 결과를 실험 결과와 비교 평가 하였다. 그리고, 개발된 신형 상하단고정체의 구조적 특성을 한국 표준형 상하단고정체의 특성과 비교 평가하여 신형 상하단고정체를 사용한 핵연료집합체의 지지경계조건을 설정하고 그 영향을 평가하였다.

2. 주파수 방정식

 핵연료집합체와 같이 양단 탄성 지지를 받는 구조물의 주파수 방정식을 유도하기 위하여 전단변형과 회전 관성 효과를 무시하는 균일한 탄성보를 고려하였다.

이 보의 운동 방정식은 식(1)과 같다.

$$EI\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + r\ A\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

여기서 $w(x,t)$ 는 보의 길이를 따라 시간 t와 길이 x에서의 횡방향 변위이고, EI는 보의 굽힘 강성, r 는 밀도, A 는 보의 단면적을 나타낸다.

그러면, 어떤 진동 모드에 대하여 횡방향 변위 $w(x,t)$ 는 식(2)와 같이 변수 분리형으로 쓸 수 있다.

$$w(x,t) = y(x)\ \ Cos\ w\,t \tag{2}$$

여기서, $y(x)$ 는 모드 변위 함수이고, w 는 고유진동수이다.
함수 $y(x)$ 는 Fourier Sine 혹은 Cosine 급수 어느것으로도 표현될 수 있으나, 본 연구에서는 Sine 급수를 이용한다. 이 경우 $y(x)$ 함수는 $x = 0$ 와 $x = L$에서 정의되지 않으므로 식(3)과 같이 양단과 중간 부분으로 나누어 정의하여야 한다.

$$y(x) = \begin{cases} y_0 & , x = 0 \\ y_L & , x = L \\ \sum_{m=1}^{\infty} A_m\, Sin\frac{mp\ x}{L} & , 0 < x < L \qquad \text{(m=1,2,3..)} \end{cases} \tag{3}$$

이 Fourier 급수의 도함수는 Stoke's Transformation을 이용하여 얻을 수 있으며 자세한 유도 과정은 저자의 논문에 자세히 기술되어 있다 [1]. 이 도함수를 운동 방정식 식(1)에 대입하여 정리하면 어떠한 기하학적 구속을 갖지 않는 보의 자유진동에 대한 변위 함수를 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$w(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a_m^{\,3} L}\frac{w_n^2}{w^2 - w_n^2}\left\{\left(y_0'' - (-1)^m y_L''\right) - a_m^{\,2}\left(y_0 - (-1)^m y_L\right)\right\} Sin\ a_m x\ Cos\, w\,t \tag{4}$$

여기서

$$a_m = \frac{mp}{L}$$

$$y''(0) = y''_0 \quad , \quad y''(L) = y''_L$$

$$A_m = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{a_m{}^3 L} \frac{w_n^2}{w^2 - w_n^2} \left\{ \left(y''_0 - (-1)^m y''_L \right) - a_m{}^2 \left(y_0 - (-1)^m y_L \right) \right\}$$

$$w_n^2 = \frac{EI}{rA} a_m{}^4$$

이제 그림 1과 같은 양단이 병진 스프링과 회전 스프링으로 지지되는 보를 생각하면, 다음과 같은 경계조건을 얻는다.

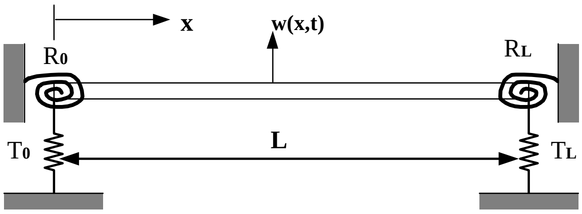


그림 1. 양단 복합 탄성지지 보

$$T_0\, w_0 = -EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad , \; R_0 \frac{\partial w}{\partial x} = EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad , \text{ at x = 0} \qquad (5), (6)$$

$$T_L\, w_L = EI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \quad , \; R_L \frac{\partial w}{\partial x} = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad , \text{ at x = L} \qquad (7), (8)$$

여기서 T_0 와 T_L 은 각각 x = 0 와 x = L 에서의 병진 스프링 상수이고, R_0 와 R_L 은 각각 회전 스프링 상수를 나타낸다.

이 경계조건식(5),(6), (7), 및 (8)을 식(4)의 도함수들에 대입하여 정리하면 식(9)와 같은 방정식을 얻는다.

$$\left[S_{ij} \right] \left\{ y''_0 ,\; y''_L ,\; y_0 / L^2 ,\; y_L / L^2 \right\}^T = \left\{ 0 \right\} , \; (i,\, j = 1, 2, 3, 4) \qquad (9)$$

식(9)가 의미있는 해를 갖기 위해서는 계수행렬의 행렬식(determinant)이 반드시 0 이 되어야 한다. 즉,

$$\left| S_{ij} \right| = 0 \,, \quad (i,\ j = 1,2,3,4) \tag{10}$$

부록 A에 이 행렬식 각각의 요소를 나타내었다.

3. 수치해석

3.1 주파수 방정식의 민감도 분석

본 논문에서 유도하여 사용한 주파수 방정식은 무한 급수의 형태로 수식화 되었으므로 해의 정밀도는 고려하는 급수의 수에 따라 변화하게 된다. 즉, 고려하는 급수의 수를 적게 하면 계산시간은 매우 줄어들 수 있지만 해의 정확도가 떨어지게 되므로 적절한 급수의 수를 알아보기 위하여 그림 2와 같이 한쪽 끝은 단순 지지되고 한쪽 끝은 자유 단인 보 (S-F Beam) 에 회전 스프링과 병진 스프링이 각각 지지하는 보에 대하여 수치해석을 수행하고, 이때 고려하는 급수의 수에 따라 엄밀해에 접근해가는 민감도를 분석하였다.

그림 3은 이때 주파수 매개변수(frequency parameter)를 도시한 것이다. 표 1은 1차 모드에 대해서 고려한 급수의 수에 대한 주파수 매개변수의 값을 참고문헌 2에서 제시한 엄밀해와 비교한 것이고, 그림 4는 이를 도식적으로 나타낸 것이다. 이 표와 그림에서 보는 바와 같이 본 논문에서 사용한 주파수 방정식은 고려한 급수의 수에 비례하여 엄밀해에 지수적으로 접근하며, 대개의 경우 100개의 항을 사용하면 충분히 의미있는 고유진동수를 얻을 수 있다.

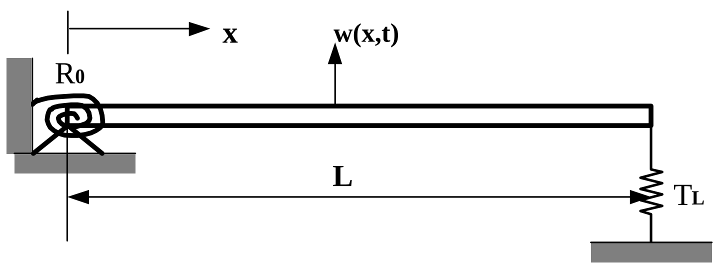


그림 2. 회전 스프링을 갖는 단순지지단과 병진스프링으로 지지되는 자유단으로 이루어진 보

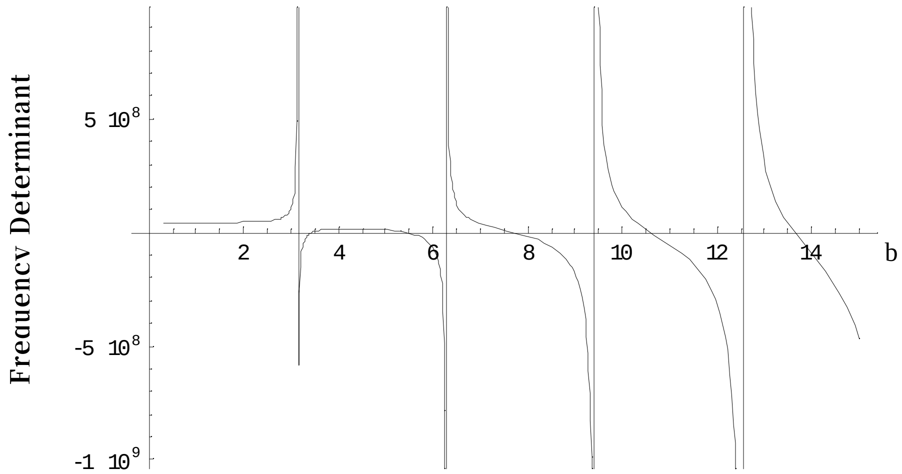


그림 3. S-F Beam의 주파수 매개변수

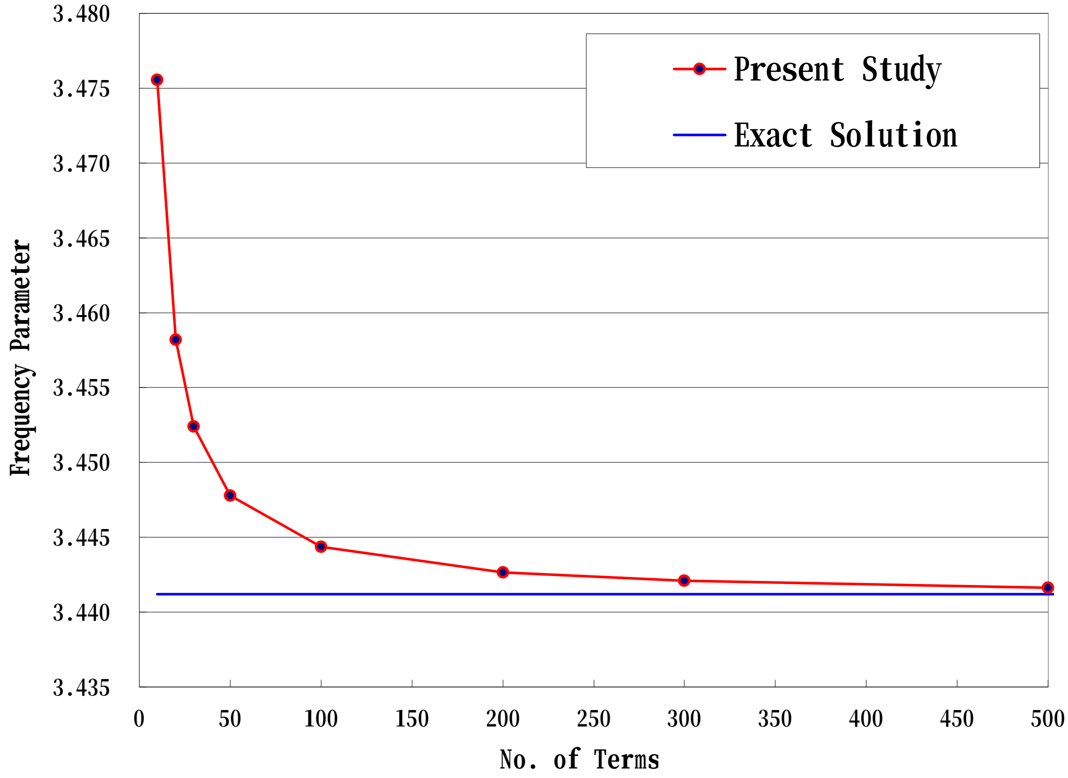


그림 4. S-F Beam에 있어서 급수의 수에 따른 주파수 매개변수 수렴율

표 1. S-F Beam에 있어서 급수의 수에 따른 주파수 매개변수

No. of Terms	1^{st} Mode
10	3.47554
20	3.45817
30	3.45241
50	3.44781
100	3.44437
200	3.44265
300	3.44208
500	3.44162
1000	3.44128
Exact Solution [2]	3.441219

3.2 핵연료집합체 해석

그림 5는 본 논문에서 고려한 한국 표준형 발전소에 사용되고 있는 핵연료집합체를 나타낸 것이다. 이 핵연료집합체는 16x16 격자구조로 236개의 연료봉과 4개의 안내관, 1개의 계측관, 11개의 지지격자 및 상하단고정체로 구성되어 있다. 안내관과 지지격자 및 상하단고정체는 핵연료집합체의 골격을 이루며 외부 충격으로부터 연료봉을 보호하는 기능을 갖는다. 그리고, 핵연료집합체는 원자로 내부 구조물의 상부노심 지지판과 상단고정체, 하부노심지지판과 하단고정체의 간섭에 의해 지지되고 있다. 즉, 핵연료집합체의 지지조건은 횡방향 변위 및 회전자유도가 구속되면 양단 고정된 구조물로 모사될 수 있고, 그렇지 않고 변위자유도만 구속된다면 단순 지지되는 구조물로 모사될 수 있을 것이다. 그러나, 실제로 한국 표준형 핵연료집합체는 고정지지와 단순 지지사이에 있는 중간 성격의 원자로 양단조건이라는 특이한 지지조건을 갖는 것으로 간주되고 있다.

저자는 한국 표준형 핵연료집합체에 대한 유한요소 해석 모델을 개발하고 시험 결과와 비교하여 개발된 모델이 실험값과 잘 일치함을 확인하였다 [3]. 본 연구에서는 이전에 수행한 연구에서 파악한 한국 표준형 핵연료집합체의 기계적 특성을 이용하여 핵연료집합체를 그림 6과 같이 균일한 보로 단순화하고 그 경계 조건을 회전 스프링으로 모사하여 원자로의 실제 경계조건에서의 핵연료집합체 진동 특성을 앞에서 유도한 주파수 방정식을 이용하여 간단히 평가하였다. 그림에서 회전 스프링 무차원 변수 $\overline{R}_0$, $\overline{R}_L$ 의 값을 통하여 원자로 양단조건을 부과할 수 있다. 먼저, 회전 스프링 무차원 변수 $\overline{R}_0$, $\overline{R}_L$ 의 값을 변화시켜 가며 이들이 진동 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 표 2는 1차 모드에서 3차 모드까지 주파수 매개변수 결과를 나타낸 것이며, 그림 7은 이를 3차원그래프로 나타낸

것이다. 표2와 그림 7을 통하여 알 수 있는 바와 같이 양단이 회전 스프링으로 지지되는 보에 있어서 무차원 회전 스프링 상수는 1~100 사이에서 가장 민감하게 영향을 미친다. 따라서, 이 범위의 스프링 상수들에 대해서는 진동수 특성들이 주의 깊게 검토되어야 함을 알 수 있다.

표 2. 양단이 회전 스프링으로 지지되는 보의 고유진동수

R_0	**1st Mode Frequency Parameter**						
	R_L						
	0.1	1	10	100	1000	10000	100000
0.1	3.172	3.288	3.684	3.916	3.951	3.955	3.955
1	3.288	3.399	3.787	4.018	4.053	4.057	4.057
10	3.684	3.787	4.169	4.412	4.450	4.454	4.454
100	3.916	4.018	4.412	4.674	4.715	4.720	4.720
1000	3.951	4.053	4.450	4.715	4.757	4.762	4.762
10000	3.955	4.057	4.454	4.720	4.762	4.766	4.767
100000	3.955	4.057	4.454	4.720	4.762	4.767	4.767
R_0	**2nd Mode Frequency Parameter**						
	R_L						
	0.1	1	10	100	1000	10000	100000
0.1	6.296	6.361	6.699	7.030	7.092	7.099	7.099
1	6.361	6.425	6.758	7.088	7.150	7.157	7.158
10	6.699	6.758	7.078	7.409	7.473	7.480	7.480
100	7.030	7.088	7.409	7.755	7.822	7.830	7.831
1000	7.092	7.150	7.473	7.822	7.891	7.899	7.900
10000	7.099	7.157	7.480	7.830	7.899	7.906	7.907
100000	7.099	7.158	7.480	7.831	7.900	7.907	7.908
R_0	**3rd Mode Frequency Parameter**						
	R_L						
	0.1	1	10	100	1000	10000	100000
0.1	9.427	9.471	9.753	10.137	10.222	10.231	10.232
1	9.471	9.515	9.795	10.177	10.261	10.282	10.283
10	9.753	9.795	10.066	10.452	10.542	10.552	10.553
100	10.137	10.177	10.452	10.849	10.943	10.953	10.954
1000	10.222	10.261	10.542	10.943	11.038	11.049	11.050
10000	10.231	10.282	10.552	10.953	11.049	11.060	11.061
100000	10.232	10.283	10.553	10.954	11.050	11.061	11.062

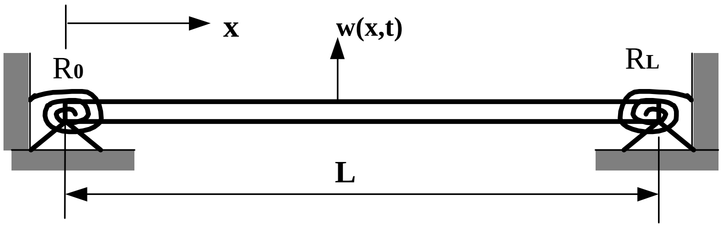


그림 6. 핵연료집합체 원자로 양단 지지조건

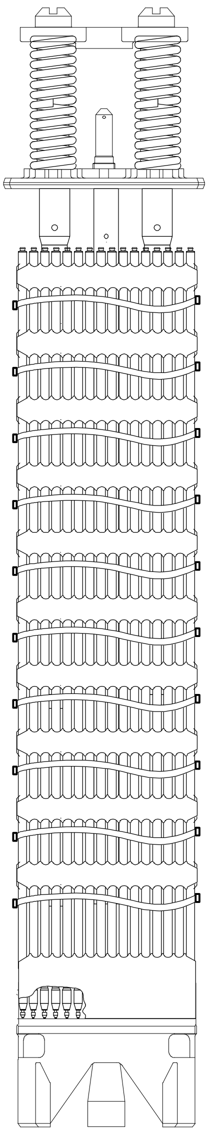
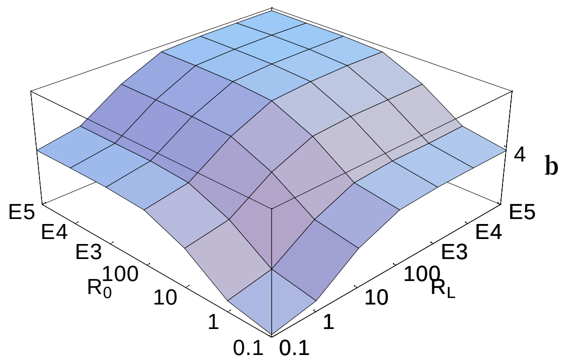
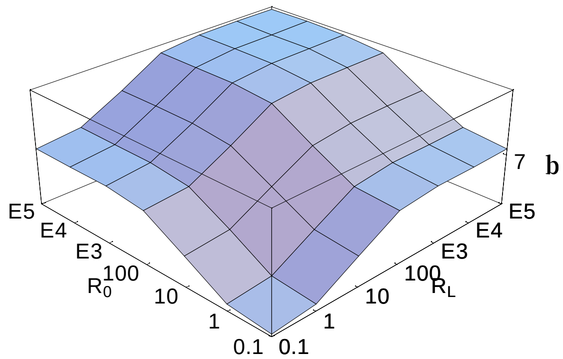


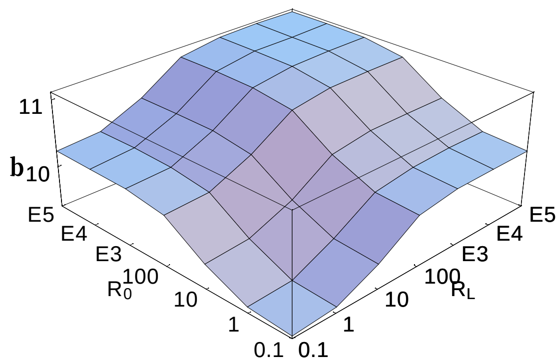
그림 5. 한국 표준 원전용 핵연료집합체



a) 1차 고유진동수



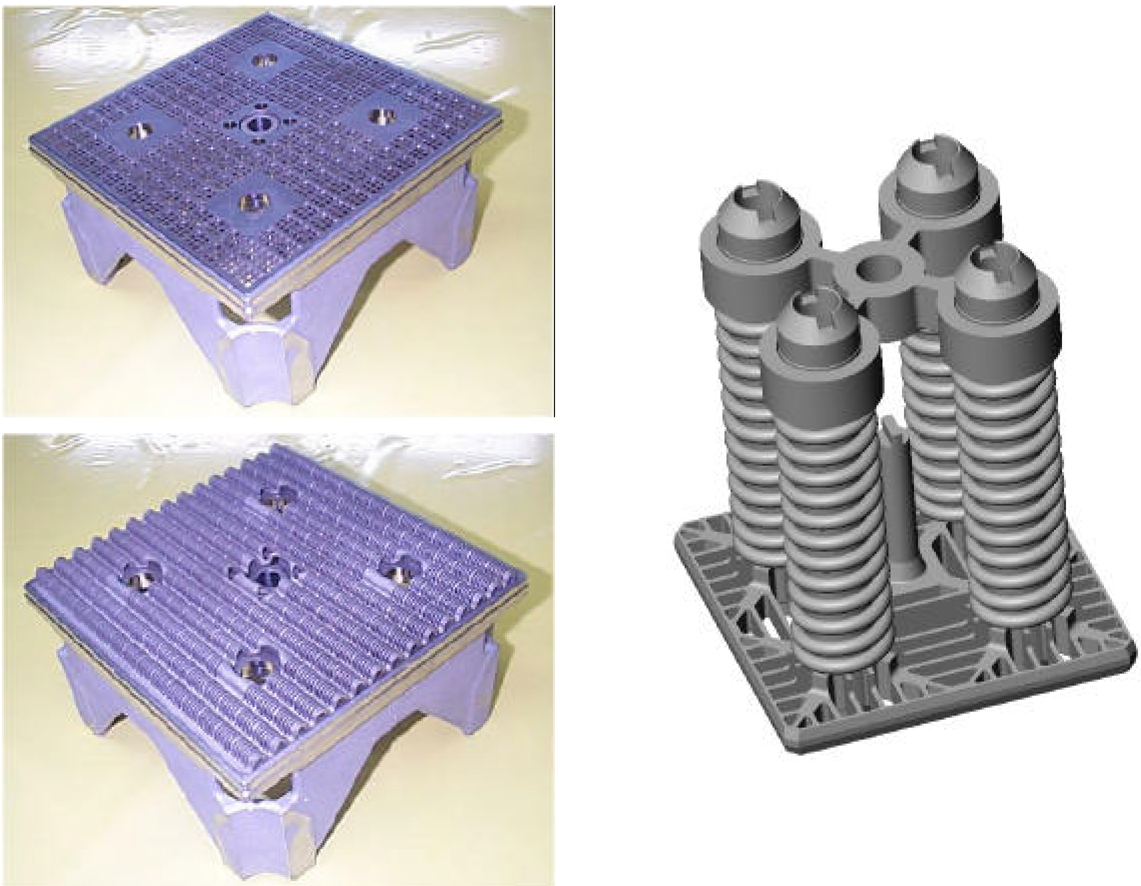
a) 2차 고유진동수



a) 3차 고유진동수

그림 7. 회전스프링 상수가 고유진동수에 미치는 영향

그림 8은 최근 한전원자력연료㈜ 설계기술원에서 과기부 과제로 개발하고 있는 신형 상하단고정체를 나타낸 것이다. 이들 모델에 있어서 신형 상단고정체의 기계적 특성은 기존 한국표준형 핵연료집합체에 사용되고 있는 상단고정체의 특성과 거의 유사한 것으로 평가되었고, 신형 하단고정체의 특성은 기존의 것에 비해 탄성이 약 25% 감소된 것으로 평가되었다[4]. 즉, 한국 표준형 핵연료집합체에 신형 상하단고정체를 사용할 경우 상부의 회전 스프링 상수는 기존 한국 표준형에서 사용되는 값을 사용할 수 있으며, 하단의 경우 약 25% 감소된 스프링 상수를 사용하여야 한다. 표 3은 한국 표준형 핵연료집합체의 회전 스프링상수 값을 비교한 것이다[5]. 표 4는 표 3의 경계조건에 대한 핵연료집합체의 고유진동수 파라메터를 위의 주파수 방정식을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 참고로, 이 계산은 Fourier급수의 처음 50개 항만을 고려하였으며, 핵연료집합체가 고정 경계를 가지는 경우와 단순 지지 경계를 가지는 경우와 비교하여 경계조건의 차이에 따른 영향을 나타내었다. 이 표에서 보는 바와 같이 신형 상하단고정체를 한국 표준형 핵연료집합체에 사용할 경우, 이로 인한 경계조건의 변화로 인하여 핵연료집합체의 고유 진동수가 조금 낮아지는 효과가 있으나 그 차이는 미미한 것으로 판단된다



a) 신형 하단고정체 주후보 모형　　b) 신형 상단고정체 주후보 모형

그림 8. Full Size 신형 상하단고정체 주후보 모형

표 3. 모사된 한국 표준형 핵연료집합체의 경계조건 비교

스프링 상수	기존 상하단고정체	신형 상하단고정체
$\overline{R}_0$	4	4
$\overline{R}_L$	12	9
$\overline{T}_0$	10^6	10^6
$\overline{T}_L$	10^6	10^6

표 4. 한국 표준형 핵연료집합체의 주파수 매개변수 비교

End Condition	기존 상하단고정체			신형 상하단고정체		
	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode	1st Mode	2nd Mode	3rd Mode
Pinned Condition	3.142	6.283	9.424	3.142	6.283	9.424
Reactor Condition	4.025	6.949	9.961	3.974	6.890	9.902
Fixed Condition	4.767	7.908	11.062	4.767	7.908	11.062

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

한국 표준형 핵연료집합체의 기계적 특성을 이용하여 핵연료집합체를 균일한 보로 단순화하고 그 경계 조건을 회전 스프링으로 모사하여 원자로의 실제 경계조건에서의 핵연료집합체 진동 특성을 간단히 평가할 수 있는 주파수 방정식을 유도하였으며, 이 방정식은 경계조건 변화에 따른 구조물의 진동특성 평가에 매우 유용하게 사용될 수 있다 .

현재 개발 중인 신형 상하단고정체를 한국 표준형 핵연료집합체에 사용할 경우, 이로 인한 경계조건의 변화로 인하여 핵연료집합체의 고유 진동수가 조금 낮아지는 효과가 있으나 그 차이는 미미한 것으로 판단된다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 신형 핵연료 상하단고정체 개발 연구비 지원으로 작성되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. H.K. Kim and M.S. Kim, “Vibration of Beams with Generally Restrained Boundary Conditions using Fourier Series,” Journal of Sound and Vibration, 245(5), pp 771-784, 2001.
2. M.J. Maurizi, R.E. Rossi, and J.A. Reyes, “Vibration Frequencies for a Uniform Beam with One End Spring-Hinged and Subjected to a Translational Restraint at the Other End,” Journal of Sound and Vibration, 48(4), PP 565-568, 1976.
3. H.K. Kim and J.S. Lee, “Development of Core Seismic Analysis Models for KNGR Fuel Assemblies Associated with 0.3 g Seismic Loads,” Nuclear Engineering and Design, 212, pp 201-210, 2002.
4. **신형상하단고정체 개발 과제 연차보고서, “상하단고정체 후보모형 3차원 모델링 및 응력해석.” 한국기술교육대학교, 2002.**
5. **설계계산 노트, “지진 및 냉각재 상실 사고시 핵연료집합체 응력해석 ,” 한전원자력연료, 1998.**

APPENDIX

Components of matrix $\left| S_{ij} \right|$

$$s_{11} = -\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{12} = \left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{13} = \left(\bar{T}_0+2p^2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{m^2 l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{14} = -\left(2p^2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m m^2 l^4}{l^4-m^4}\right)$$

$$s_{21} = \left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{22} = -\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{23} = -\left(2p^2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m m^2 l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{24} = \left(\bar{T}_L+2p^2\sum_{m=1}^{\infty}\frac{m^2 l^4}{l^4-m^4}\right)$$

$$s_{31} = \left(1-\frac{2\bar{R}_0}{p^2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{m^2}{l^4-m^4}\right),\ s_{32} = \left(\frac{2\bar{R}_0}{p^2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m m^2}{l^4-m^4}\right),\ s_{33} = \left(\bar{R}_0+2\bar{R}_0\sum_{m=1}^{\infty}\frac{l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{34} = -\left(\bar{R}_0+2\bar{R}_0\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m l^4}{l^4-m^4}\right)$$

$$s_{41} = \left(\frac{2\bar{R}_L}{p^2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m m^2}{l^4-m^4}\right),\ s_{42} = \left(1-\frac{2\bar{R}_L}{p^2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{m^2}{l^4-m^4}\right),\ s_{43} = -\left(\bar{R}_L+2\bar{R}_L\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^m l^4}{l^4-m^4}\right),\ s_{44} = \left(\bar{R}_L+2\bar{R}_L\sum_{m=1}^{\infty}\frac{l^4}{l^4-m^4}\right)$$

여기서,

$$\bar{T}_0 = \frac{T_0 L^3}{EI},\quad \bar{T}_L = \frac{T_L L^3}{EI},\quad \bar{R}_0 = \frac{R_0 L}{EI},\quad \bar{R}_L = \frac{R_L L}{EI},\quad w_n^2 = \frac{EI}{rA}\left(\frac{m^4 p^4}{L^4}\right),\quad l^4 = \frac{r\,A L^4}{p^4 EI} w^2 = \frac{b^4}{p^4}$$