2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 핵연료집합체의 공기중 진동특성 분석

Vibration Characteristic Analysis for in-air HANARO Fuel Assembly

류정수, 윤두병, 박진호, 우종섭, 전병진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에 사용되는 핵연료집합체의 진동특성을 규명하기 위하여 유동관 및 핵연료집합체의 3-D 유한요소모델을 개발하였으며, 유동관에 장전된 핵연료집합체 모델에 대한 공기중 모달해석을 수행하였다. 모달해석결과 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 기본진동모드는 각각 고유진동수가 26.4Hz 및 27.7Hz인 굽힘모드임을 확인할 수 있었다. 개발된 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 모달해석을 통하여 구한 고유진동수들을 실험을 통해 구한 고유진동수와 비교하였다. 그 결과 모달해석을 통해 구한 저차 고유진동수들이 실험치와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 유동관 및 핵연료집합체에 대한 진동특성 분석 결과들은 하나로의 운전과 유지보수를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 개발된 유한요소모델들은 핵연료집합체 설계변경시 진동특성 해석을 위한 기본 모델로 활용하고자 한다.

ABSTRACT

For investigating the vibration characteristics of the HANARO fuel assembly, the in-air 3-D finite element models of the fuel assemblies and flow tubes were developed. Then, modal analysis of the developed finite element models was carried out. The analysis results show that the fundamental vibration modes of the 18-element and 36-element fuel assemblies are lateral bending modes and its corresponding natural frequencies are 26.4Hz and 27.7Hz, respectively. For the verification of the developed FE models, modal analysis results were compared with those obtained from the experiment. These results demonstrate that the natural frequencies of lower order modes obtained from FE analysis agree well with those of the experiment. It is expected that the analysis results will be applied as an elementary data for HANARO operation and management. In addition, when it is necessary to improve the design of the fuel assembly, the developed FE models will be utilized as a base model for the vibration characteristic analysis of the modified fuel assembly.

1. 서 론

하나로는 30MW의 열출력을 가진 연구용 원자로이며, 하나로에 사용되고 있는 핵연료집합체는 원형의 18봉 핵연료집합체와 육각형의 36봉 핵연료집합체가 있다.

그림 1은 하나로의 노심내 구조물을 나타내고 있으며, 하나로 노심에는 수중에 잠긴 23개의 육각형 유동관과 8개의 원형 유동관이 있다. 유동관의 주요기능은 핵연료를 지지하는 것이며 원형 유동관에는 18봉 핵연료집합체를, 육각형 유동관에는 36봉 핵연료집합체를 장전할 수 있다.

원자로 운전중 발생하는 열은 1차 냉각펌프에 의해 발생하는 노심내 냉각수에 의해 제거되며, 이러한 냉각수는 유동관과 핵연료집합체 사이를 통과하게 된다. 이때 유동관 내부를 통과하는 냉각수 유동에 의해 핵연료집합체와 유동관에 유체기인진동(fluid induced vibration)이 발생할 가능성이 있다. 또한 지진하중을 받을 경우에도 유동관 및 핵연료집합체에 진동이 발생할 가능성이 있다.

냉각수 유동 또는 지진에 의해 핵연료집합체 또는 유동관에 과도한 진동이 발생하면 핵연료집합체 또는 유동관이 손상될 가능성이 있다. 설계 당시 핵연료집합체 및 유동관을 원자로구조물의 모델에 단순히 질량으로 처리하여 구조건전성을 평가한 바 있다[1,2]. 이들 모델에서는 핵연료집합체와 원자로구조물과의 동적 상관관계를 파악하기가 곤란하다. 따라서 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물에 대한 진동특성을 파악하기 위해서는 먼저 핵연료집합체 및 유동관에 대한 유한요소모델 개발이 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 하나로에 사용되는 원형 및 육각형 유동관과 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 공기중 진동특성을 규명하는 것이며, 이러한 목적을 달성하기 위해 유동관 및 핵연료집합체의 진동특성을 표현할 수 있는 유한요소모델을 개발하고자 한다.

또한 개발된 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행함으로써 원형 및 육각형 유동관과 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 진동특성을 파악하고, 진동특성 해석결과를 실험결과와 비교하여 개발된 유한요소모델의 타당성을 검증하고자 한다.

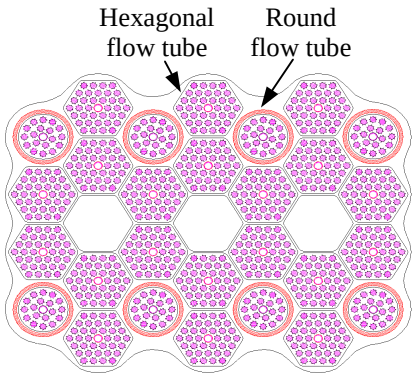


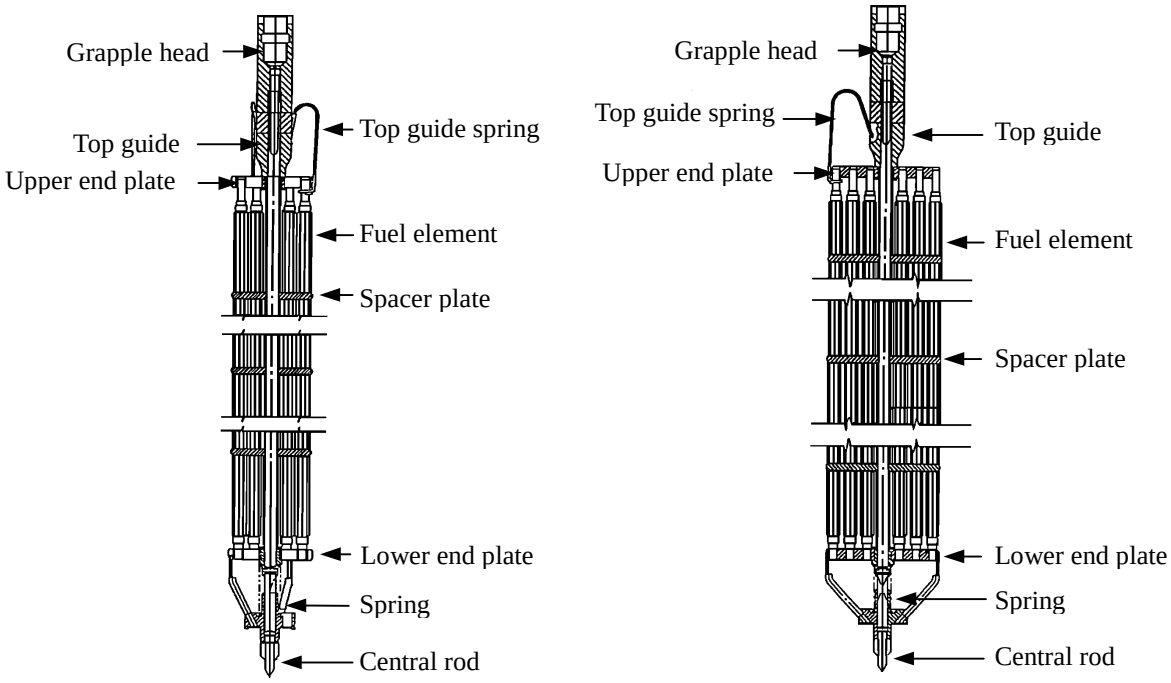
Fig. 1 Schematic diagram of HANARO core structure

2. 핵연료집합체의 유한요소 모델링

하나로 핵연료집합체의 진동특성을 규명하기 위하여 핵연료집합체와 핵연료집합체가 장전되는 유동관의 유한요소모델을 개발하였다. 그림 2는 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 형상을 나타내고 있으며, 핵연료집합체는 핵연료봉(fuel element), grapple head, top guide body / spring, top and bottom end plate, bottom guide arm, 3개의 spacer plate 및 central rod 등으로 구성되어 있다.

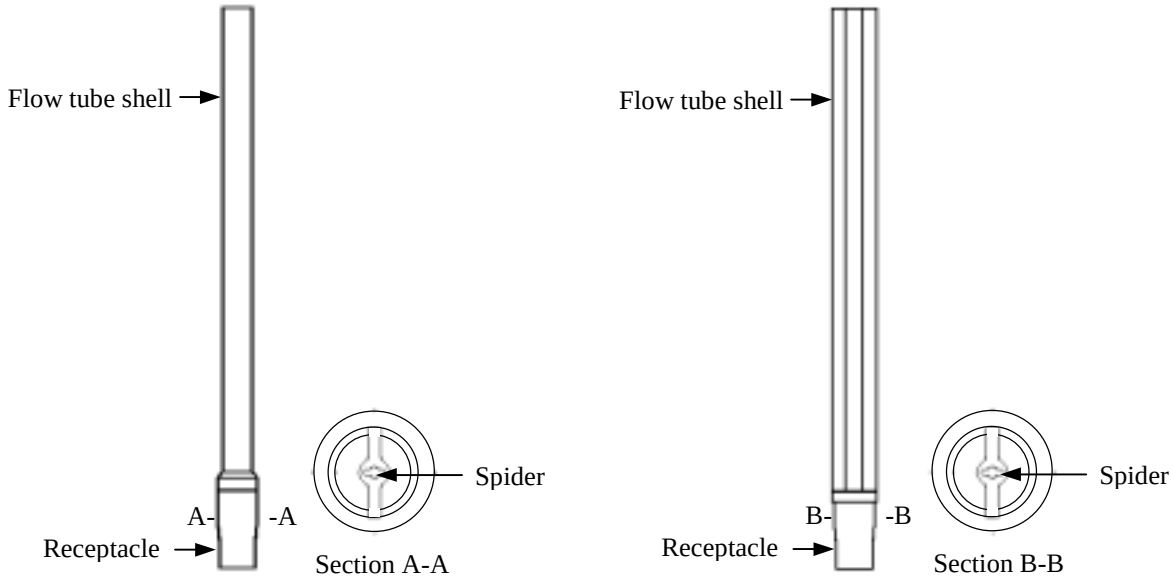
그림 3의 (a)와 (b)는 각각 18봉 및 36봉 핵연료집합체를 장전하는 원형 및 육각형 유동관을 나타내고 있으며, 유동관은 flow tube shell, spider 및 receptacle로 구성되어 있다. Flow tube shell은 핵연료집합체를 지지하는 역할을 하며, spider는 핵연료집합체를 고정하는 역할을, receptacle은 flow tube shell의 하부를 지지하는 역할을 한다. 표 1은 핵연료집합체

및 유동관을 구성하는 부품들의 물성치를 나타내고 있다.



(a) 18-element fuel assembly (b) 36-element fuel assembly

Fig. 2 Schematic diagrams of the HANARO fuel assemblies(length: 0.96m)



(a) Round flow tube (b) Hexagonal flow tube

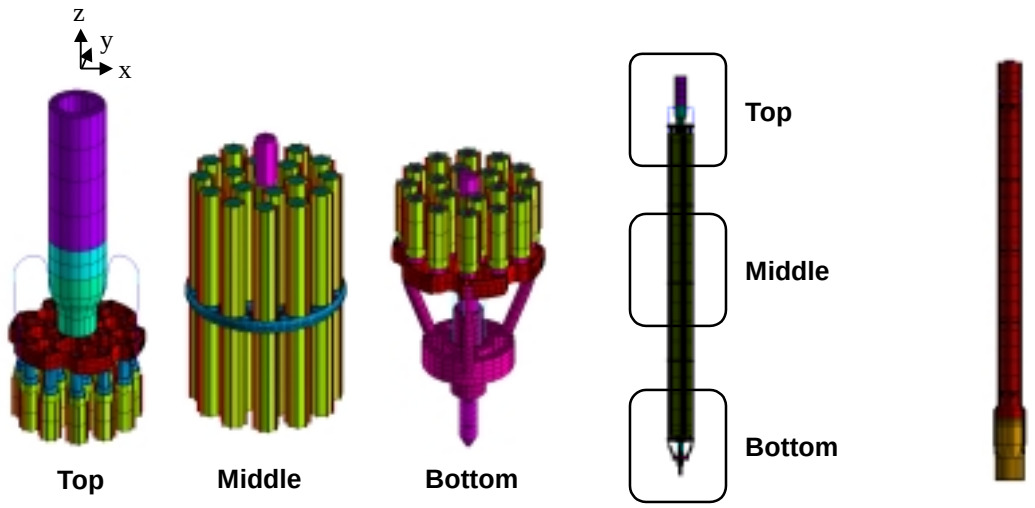
Fig. 3 Schematic diagrams of the HANARO flow tubes

Table 1 Material properties of the fuel assembly and flow tube

Components	Material	Young's Modulus(MPa)	Poisson ratio	Density(kg/m^3)
Grapple head	Zircaloy-4	8.81×10^4	0.33	6550
Top guide	Inconnel	2.07×10^5	0.33	8420
Top guide spring	Inconnel	2.07×10^5	0.33	8420
Upper end plate	Aluminum	6.62×10^4	0.33	2680
Fuel element	U_3Si-Al	5.65×10^4	0.35	5350
Spacer plate	Aluminum	6.62×10^4	0.33	2680
Lower end plate	Aluminum	6.62×10^4	0.33	2680
Spring	Inconnel	2.07×10^5	0.33	8420
Central rod	Zircaloy-4	8.81×10^4	0.33	6550
Flow tube shell	Zircaloy-4	8.81×10^4	0.33	6550
Flow tube spider	Zircaloy-4	8.81×10^4	0.33	6550
Receptacle	Stainless steel	1.88×10^5	0.28	8030

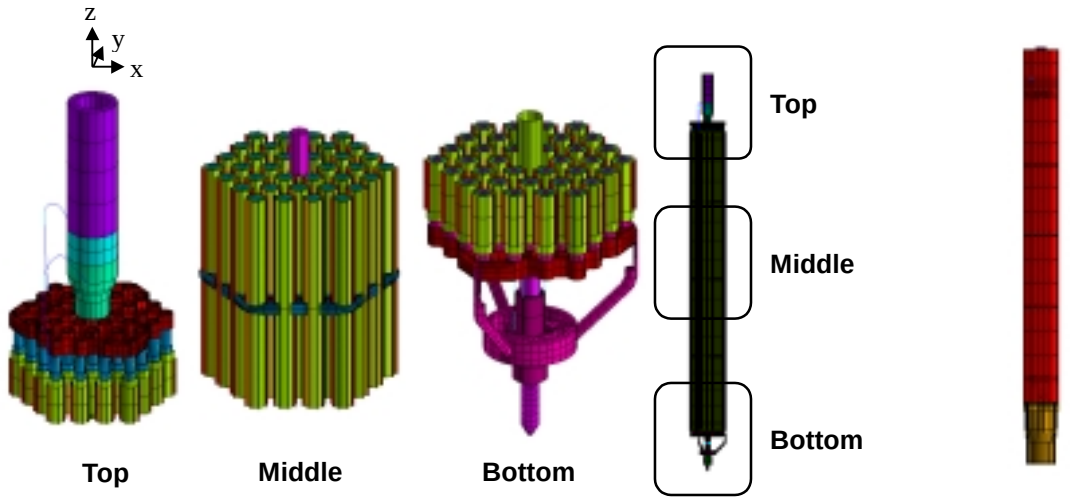
핵연료집합체의 유한요소모델을 개발하기 위하여 핵연료집합체의 CAD도면을 근거로 하여 핵연료집합체를 구성하는 각 부분에 대한 고체모델(solid model)을 작성하고, 이에 대한 요소분할을 수행하여 각 부분에 대한 유한요소모델을 구성한 후, 이들을 결합하여 핵연료집합체 전체의 유한요소모델을 구성하는 방법을 이용하였다. 이때 각 부분의 결합시 두 부품이 접하는 접점에서는 같은 절점(node)을 공유해야 하므로 이를 고려하여 요소분할을 수행하였다.

그림 4는 ANSYS[3]를 이용하여 개발한 18봉 핵연료집합체 및 원형 유동관의 유한요소모델을 나타내고 있으며, 그림 5는 36봉 핵연료집합체 및 육각형 유동관의 유한요소모델을 나타내고 있다.



(a) 18-element fuel assembly (b) round flow tube

Fig. 4 Finite element model of the 18-element fuel assembly and round flow tube



(a) 18-element fuel assembly (b) hexagonal flow tube

Fig. 5 Finite element model of the 36-element fuel assembly and hexagonal flow tube

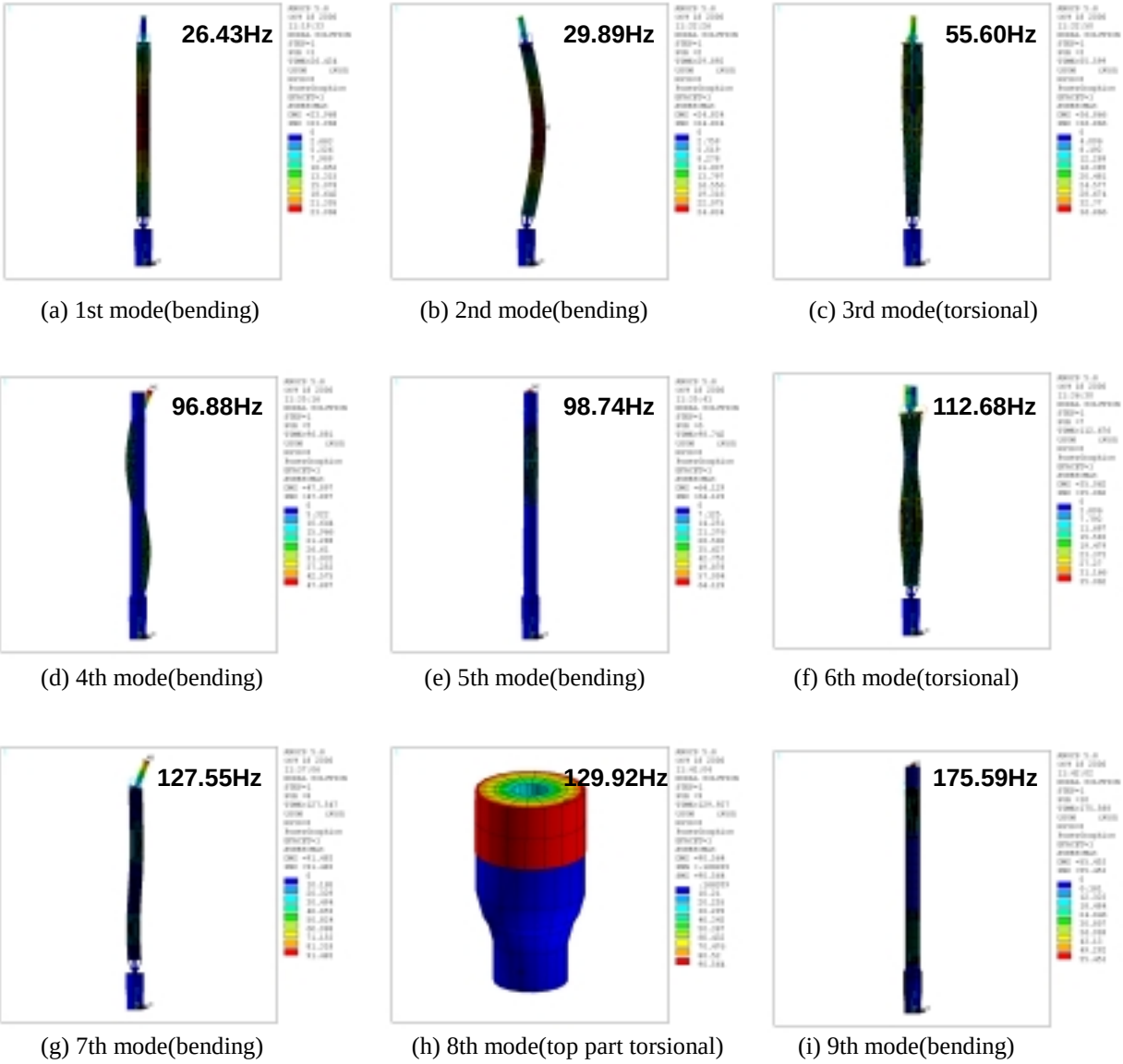
3. 핵연료집합체의 공기중 진동특성 분석

3.1 유한요소모델에 대한 모달해석

핵연료집합체의 진동특성을 규명하기 위해 상용프로그램인 ANSYS[3]를 사용하여 개발된 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 3-D 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행하였다. 핵연료집합체가 장전되는 유동관의 하단부는 고정되어 있으므로, 이를 고려하기 위해 receptacle 하단부의 병진 및 회전운동 자유도를 구속하여 모달해석을 수행하였다. 또한 핵연료집합체가 유동관에 장전된 상태에서 핵연료집합체의 top guide spring과 유동관이 접하는 접점에서의 유동관 및 top guide spring의 반경방향 변위는 같으므로 모달해석시 경계조건에 이를 고려하였다.

그림 6은 이러한 경계조건하에서 모달해석을 통하여 구한 18봉 핵연료집합체의 고유진동수 및 모드형상을 나타내고 있다. 그림 6을 관찰해보면 유동관에 장전된 핵연료집합체는 세장비가 큰 구조물이므로, 고유진동수중 최저주파수를 갖는 진동모드, 즉 기본모드(fundamental mode)는 굽힘모드(bending mode)임을 관찰할 수 있으며 이에 해당하는 고유진동수는 26.43Hz임을 관찰할 수 있다. 또한 그림 6 (b)를 관찰해보면 두번째 고유진동수는 첫번째 고유진동수와 유사하며, 이에 해당하는 진동모드는 X 방향의 굽힘 모드임을 관찰할 수 있다. 이는 X-Y 평면상에서 대칭구조를 갖기 때문에 두개의 진동모드가 근접한 고유진동수를 갖는 것으로 판단할 수 있다. 그림 6 에서 고차모드를 관찰해보면 1차 및 2차 진동모드와 유사하게 근접한 고유주파수를 갖는 진동 모드들이 쌍으로 존재함을 확인할 수 있다.

그림 6 (c) 와 (f)를 관찰해보면 18봉 핵연료집합체의 비틀림 진동모드가 발생하는 모드형상을 가지며, 고유진동수는 55.6 Hz, 112.68 Hz 임을 관찰할 수 있다.



(a) 1st mode(bending) (b) 2nd mode(bending) (c) 3rd mode(torsional)

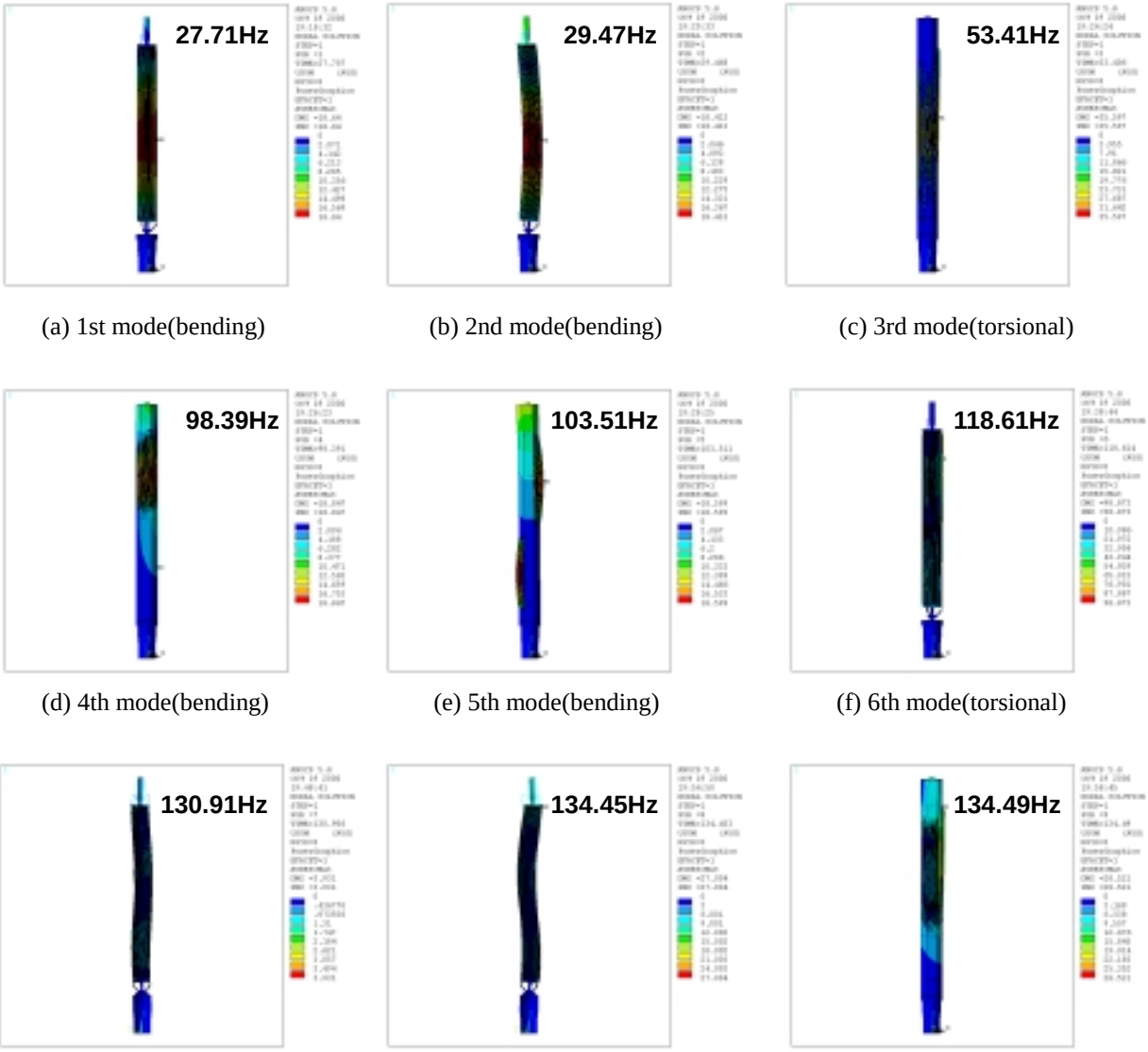
(d) 4th mode(bending) (e) 5th mode(bending) (f) 6th mode(torsional)

(g) 7th mode(bending) (h) 8th mode(top part torsional) (i) 9th mode(bending)

Fig. 6 Mode shapes of the 18-element fuel assembly after loading

그림 7은 모달해석을 통하여 구한 36봉 핵연료집합체의 고유진동수 및 모드형상을 나타내고 있다. 그림 7을 관찰해보면 18봉 핵연료집합체의 경우와 마찬가지로 유동관에 장전된 36봉 핵연료집합체는 세장비가 큰 구조물이므로, 가장 낮은 고유진동수(27.7Hz)에 해당하는 진동모드는 굽힘모드(bending mode)임을 관찰할 수 있다. 그림 7 (a), (b), (d), 및 (e)를 관찰해보면 18봉 핵연료집합체의 경우와 마찬가지로 근접한 주파수에서 굽힘진동모드들이 쌍으로 존재함을 확인할 수 있다. 또한 그림 7 (c)와 (f)를 관찰해보면 36봉 핵연료집합체의 비틀림진동이 발생하는 모드 형상을 나타내며, 고유진동수는 53.4 Hz와 118.6 Hz임을 관찰할 수 있다.

표 2는 모달해석을 통해 구한 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 고유진동수를 정리하여 나타내고 있다.



(a) 1st mode(bending) (b) 2nd mode(bending) (c) 3rd mode(torsional)

(d) 4th mode(bending) (e) 5th mode(bending) (f) 6th mode(torsional)

(g) 7th mode(bending & torsional) (h) 8th mode(bending & torsional) (i) 9th mode(top part torsional)

Fig. 7 Mode shapes of the 36-element fuel assembly after loading

Table 2 Natural frequency of the fuel assemblies obtained from the modal analysis

Mode	Natural frequency(Hz)	
	18-element fuel assembly	36-element fuel assembly
1	26.4	27.7
2	29.9	29.5
3	55.6	53.4
4	96.9	98.4
5	98.7	103.5
6	112.7	118.6
7	127.6	130.9
8	129.9	134.5
9	175.6	134.5

3.2 핵연료집합체의 모달시험

개발된 핵연료집합체의 3-D 유한요소모델과 모달해석결과의 정확성을 검증하기 위하여 18봉 및 36봉 핵연료집합체에 대한 모달시험(modal test)을 수행하였다.

그림 8은 핵연료집합체의 모달시험을 수행하기 위한 시험장치 구성도[4]를 나타내고 있다. 실제로 원자로 내에서 유동관의 하단부는 grid plate에 고정되어 있으므로 이와 같은 조건을 만들기 위해 시험에 사용된 유동관의 하단부를 receptacle에 고정한 후 receptacle 하단부를 용접으로 고정하였다. 18봉 및 36봉 핵연료집합체가 각각 원형 및 육각형 유동관에 장전된 상태에서 모달시험을 수행하였다. 핵연료집합체를 가진하기 위하여 충격해머(impact hammer)를 사용하였으며, 가진력과 핵연료집합체의 진동응답을 측정하기 위하여 힘변환기(force transducer)와 가속도계(accelerometer)를 사용하였다. 또한 충격해머의 가진위치를 변화시키면서 힘변환기와 가속도계를 통해 얻은 가진력과 진동응답으로부터 핵연료집합체의 주파수응답함수(frequency response function)를 구하고, 주파수응답함수를 분석하여 고유진동수를 구하였다[4,5].

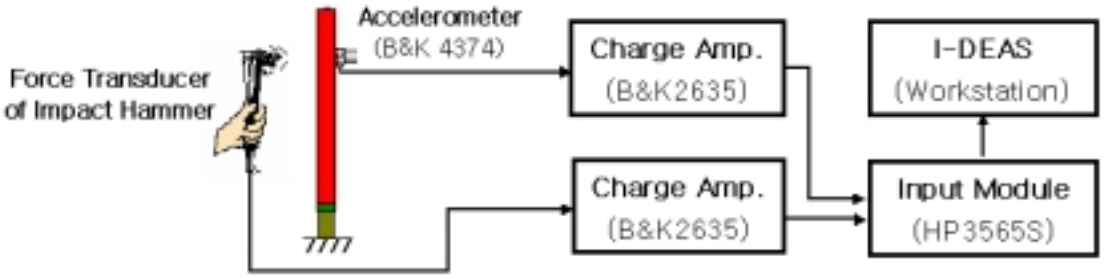


Fig. 8 Experimental setup for measuring the natural frequencies of the fuel assembly

표 3은 모달시험을 통해 얻어진 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 고유진동수를 나타내고 있다. 표 3을 표 2와 비교해보면 실험을 통해 구한 고유진동수들이 해석을 통해 구한 고유진동수와 유사하게 나타남을 관찰할 수 있다. 따라서 개발된 유한요소모델이 낮은 주파수영역에서의 핵연료집합체의 진동특성을 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 개발된 핵연료집합체의 유한요소모델의 타당성을 검증할 수 있다.

Table 3 Natural frequency of the fuel assemblies obtained from the modal test

Mode No.	Natural frequency(Hz)	
	18-element fuel assembly	36-element fuel assembly
1	26	28
2	-	31
3	58	64

4. 결 론

하나로 핵연료집합체의 진동특성 규명을 위하여 원형 및 육각형 유동관, 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 공기중 3-D 유한요소모델을 개발하였으며, 이에 대한 모달해석을 수행하여 유동관 및 핵연료집합체의 진동특성을 대표하는 고유진동수와 모드형상을 구하였다. 모달해석결과 유동관에 장전된 공기중 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 기본진동모드는 각각 고유진동수가 26.4Hz 및 27.7Hz인 굽힘모드임을 확인할 수 있었다.

개발된 공기중 핵연료집합체 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 모달해석을 통하여 구한 고유진동수들을 모달시험을 통해 구한 고유진동수와 비교하였다. 그 결과 유한요소모델에 대한 모달해석을 통해 구한 저차 고유진동수들이 시험치와 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 개발된 유한요소모델이 저주파영역에서 실제 핵연료집합체의 진동특성을 잘 표현함을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서 개발된 유한요소모델은 수중 핵연료집합체에 대한 동특성 분석을 위한 기초 모델로 활용될 수 있으며, 향후 핵연료집합체의 설계변경시 동특성 및 응력해석을 위한 기본 모델로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 한국원자력연구소의 기관고유사업으로 수행되었다.

참고문헌

[1] A.S. Banwatt, “Stress Analysis for the KMRR Reactor Assembly,” AECL T.D.S. SR-37-31200-001, Rev. 2, 1992.11.16.

[2] K.C. Chou, “Seismic Analysis Report of the Reactor Structure Assembly”, AECL T.D.S. SR-37-31200-002, Rev. 1, 1991.9.27.

[3] ANSYS 5.7, User’s Manual, ANSYS Inc.

[4] 박진호, 김태룡, 류정수, "하나로 핵연료집합체의 고유진동수 측정,” KAERI/RR-1810/97 한국원자력연구소, 1998.1.

[5] D. J. Ewins, *Modal Testing*: *Theory and Practice*, Research Studies Press, Letchworth, England, 1984.