2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 핵연료집합체와 유동관의 수중 진동특성 분석

Vibration Characteristic Analysis for HANARO Fuel Assembly and Flow Tube Submerged in the Water

류정수, 윤두병, 박진호, 조영갑, 우종섭
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 핵연료집합체와 유동관의 수중에서의 진동특성 규명을 위하여 핵연료집합체와 유동관의 수중 유한요소모델을 개발하고, ANSYS 프로그램을 이용하여 모달해석을 수행하였다. 모달해석 결과 수중 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 기본 진동모드는 각각 고유진동수가 16.1Hz 및 16.5Hz인 굽힘모드임을 확인할 수 있었다. 개발된 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 모달해석을 통하여 구한 고유진동수들을 실험으로 구한 고유진동수와 비교하였다. 그 결과 유한요소모델에 대한 모달해석을 통하여 구한 기본 고유진동수들이 실험치와 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 동적유체질량 산정이 타당함을 알 수 있었다.

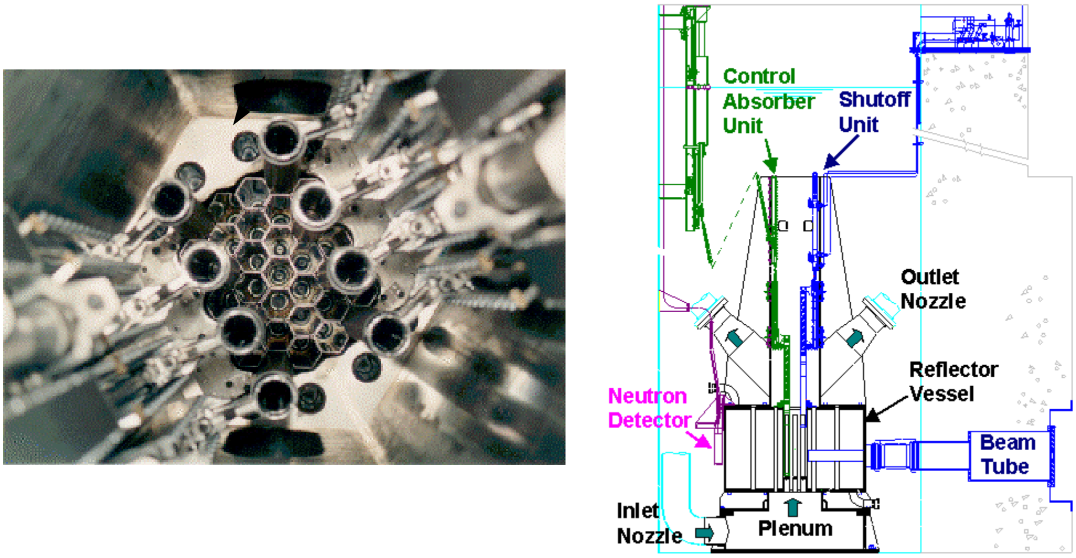
Abstract

The vibration characteristics of HANARO fuel assembly and flow tube that submerged in the water have been investigated. For this purpose, the finite element models of the in-water fuel assemblies and flow tubes were developed. Then, modal analysis of the developed finite element models were performed by utilizing the ANSYS program. The analysis results show that the fundamental vibration modes of the in-water 18-element and 36-element fuel assemblies are lateral bending modes, and its natural frequencies are found to be 16.1Hz and 16.5Hz, respectively. For the verification of the developed finite element models, modal analysis results were compared with those obtained from the modal test. These results demonstrate that the natural frequencies of the first mode obtained from finite element analysis agree well with those of the modal test and the estimation of the hydrodynamic mass is appropriate.

1. 서 론

하나로(Hi-flux Advanced Neutron Application Reactor)는 30MW의 열출력을 가진 연구용 원자로로서 핵연료 및 재료의 조사시험, 동위원소 생산, 중성자 빔을 이용한 연구, 중성자 방사화 분석 등에 활발하게 이용되고 있다.

그림 1 (a)는 하나로의 노심 내부 구조물을 나타내고 있으며, 하나로 노심은 2 가지의 서로 다른 형태의 원형 18봉 핵연료집합체와 육각형 36봉 핵연료집합체를 사용하고 있다. 하나로 노심에는 수중에 잠긴 23개의 육각형 유동관과 8개의 원형 유동관이 있으며, 원형 유동관에는 18봉 핵연료집합체를, 육각형 유동관에는 36봉 핵연료집합체를 장전할 수 있도록 되어 있다.



(a) Top view of the reactor core (b) Side view of the reactor structure

Fig. 1 Reactor Structures of HANARO

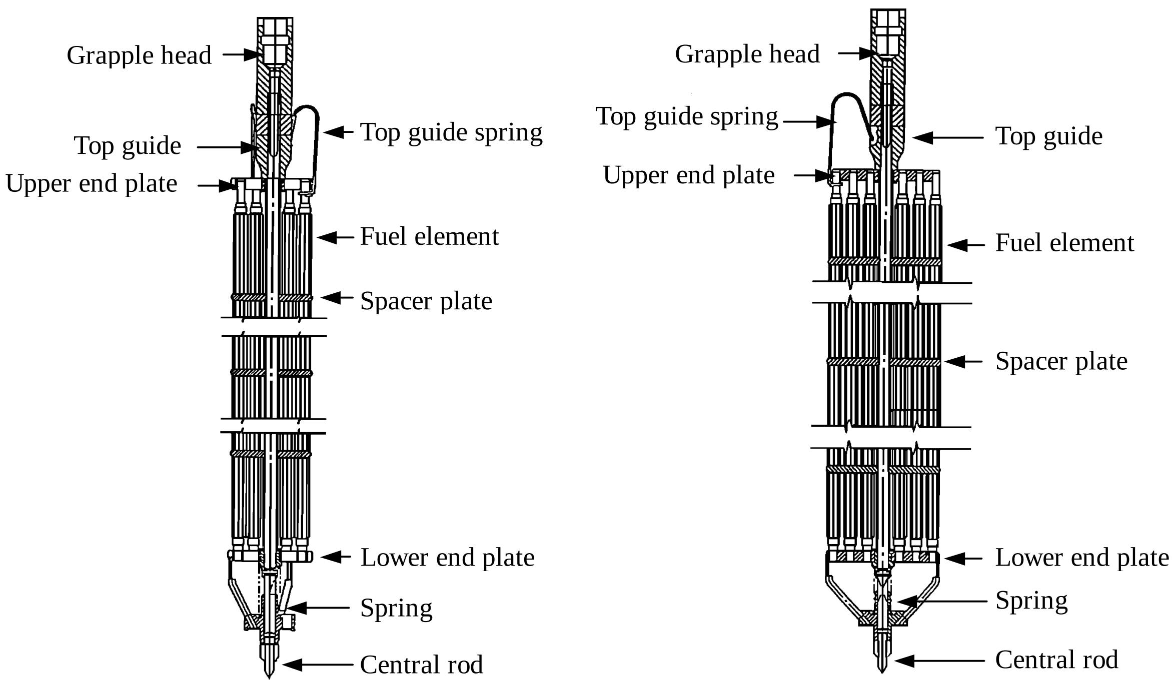
원자로 운전중 핵연료에서 발생하는 열은 그림 1(b)에서 보여주는 바와 같이 1차 냉각 펌프에 의해 입구 노즐(inlet nozzle)로 유입된 후 노심 내부를 거쳐 출구 노즐(outlet nozzle)로 배출되는 냉각수에 의해 제거되며, 유동관 내부를 통과하는 냉각수 유동에 의해 핵연료집합체와 유동관에 유체기인진동(fluid induced vibration)이 발생할 가능성이 있다 [1]. 따라서 이러한 유체기인진동에 대한 핵연료집합체 및 유동관의 구조건전성을 검증할 필요가 있으며, 이를 위해서는 일차적으로 핵연료집합체와 유동관의 진동특성을 규명하는 것이 필요하다. 참고문헌 [2]에서는 핵연료집합체와 유동관의 진동특성을 규명하기 위한 기초연구로서 공기중 핵연료집합체 및 유동관의 유한요소모델을 개발하고 이에 대한 모달해석을 수행하여 공기중 핵연료집합체의 진동특성을 분석하였다.

실제로 핵연료는 수중에서 사용되고 있으므로 본 연구에서는 참고문헌 [2]에서 개발된 공기중 핵연료집합체의 유한요소모델을 기초로 하여 수중 핵연료집합체의 진동특성을 표현할 수 있는 유한요소모델을 개발하고자 한다. 또한 개발된 유한요소모델에 대한 모달해석을 통해 수중에서의 원형 및 육각형 유동관과 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 진동특성을 파악하고, 진동특성 해석결과를 실험결과와 비교하여 개발된 수중 유한요소모델의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 수중 핵연료집합체와 유동관의 유한요소 모델링

2.1. 핵연료집합체와 유동관의 형상 및 재질

그림 2는 하나로에 사용되는 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 형상을 나타내고 있다. 하나로에 사용되는 연료봉은 20 % 농축 우라늄 (U-235)을 포함하고 있으며, 핵연료집합체는 다수의 연료봉을 지지, 고정하기 위한 upper end plate, bottom end plate, spacer plate 및 central rod 등으로 구성되어 있다. 표 1은 핵연료집합체의 재질 및 물성치를 정리하여 나타내고 있다



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

Fig. 2 Schematic diagrams of the HANARO fuel assemblies

Table 1 Material properties of the HANARO fuel assembly

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

그림 3은 원형 및 육각형 유동관을 나타내고 있으며, 유동관은 flow tube shell, spider 및 receptacle로 구성되어 있다. Flow tube shell은 핵연료집합체를 지지하는 역할을 하며, spider는 핵연료집합체를 유동관에 고정하는 역할을 한다. 또한 receptacle은 원자로구조물에 고정되어 있으며, flow tube shell을 지지한다. 표 2는 유동관을 구성하는 부품들의 물성치를 나타내고 있다.

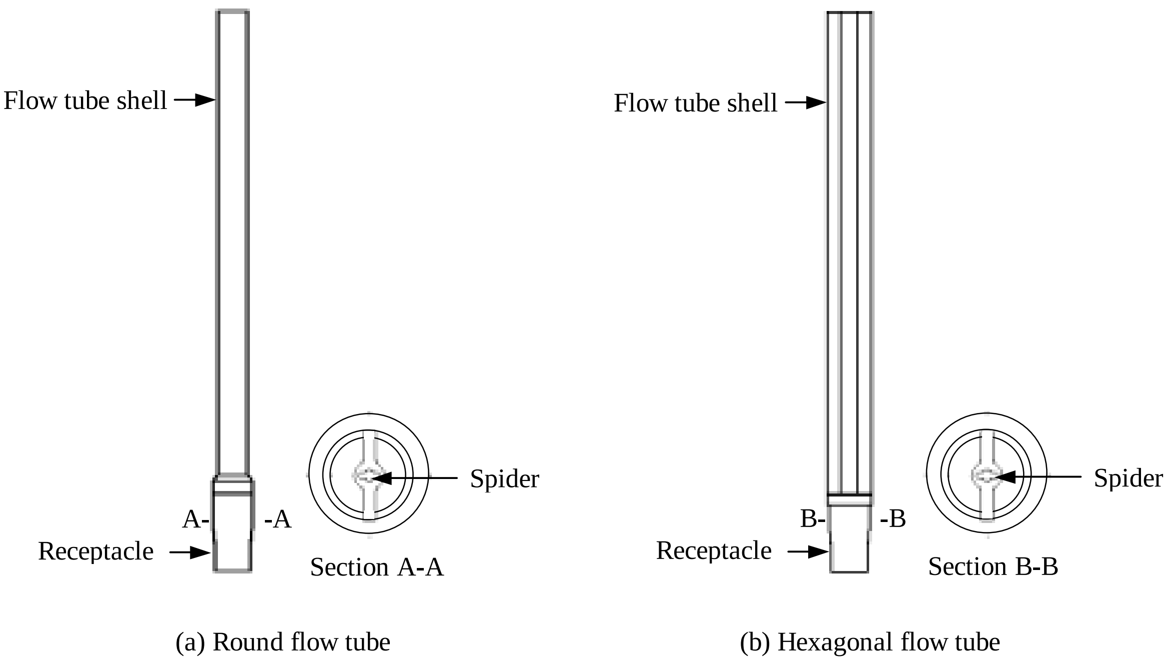


Fig. 3 Schematic diagrams of the HANARO flow tubes

Table 2 Material properties of the flow tube

Components	Material	Young's Modulus(MPa)	Poisson ratio	Density(kg/m^3)
Flow tube shell	Zircaloy-4	8.81×10^4	0.33	6550
Spider	Zircaloy-4	8.81×10^4	0.33	6550
Receptacle	Stainless steel	1.88×10^5	0.28	8030

2.2. 유동관 및 핵연료집합체에 대한 동적유체질량 산정

수중에 잠긴 구조물에 대한 진동특성 해석을 수행할 경우에는 유체와 구조물 사이의 동적 상호작용 효과를 엄밀하게 고려하여야 한다. 이를 위해서는 유체-구조물 상호작용을 고려한 3-D 해석을 수행하여야 한다. 그러나 엄밀한 3-D 유체-구조물의 상호작용 해석은 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서, 유체가 구조물의 동적거동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 구조물의 단위길이당 작용하는 동적유체질량을 산정한 후, 구조물의 질량에 유체의 동적유체질량을 더하여 등가질량으로 사용할 수 있다[3,4].

참고문헌 [5,6]에서는 수중에 잠긴 하나로 유동관 및 핵연료집합체에 작용하는 동적유체질량을 산정하기 위한 연구를 수행하였으며, 상용 유한요소 전산 프로그램에서 쉽게

사용될 수 있는 유동관 및 핵연료집합체의 집중 동적유체질량의 적합한 기준을 제시하였다.

본 연구에서는 참고문헌 [5,6]의 결과를 이용하여 유동관 및 핵연료집합체에 부가되는 동적유체질량을 표 3과 같이 산정하였으며, 이를 유동관 및 핵연료집합체의 수중 유한요소모델 개발에 이용하였다.

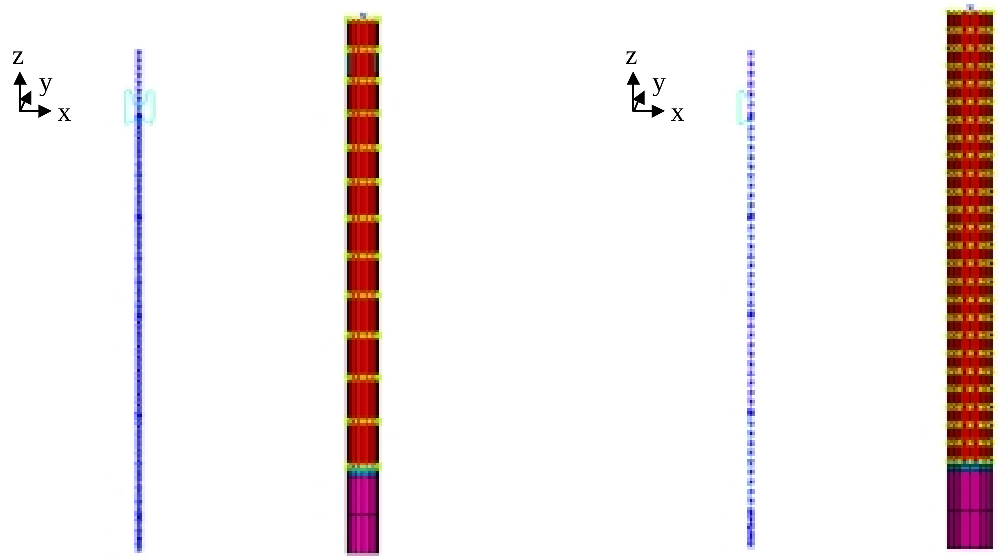
Table 3 Hydrodynamic mass of the flow tubes and fuel assemblies of HANARO

Components	Added mass (kg)
Round flow tube	1.396
Hexagonal flow tube	2.487
18-element fuel assembly	1.671
36-element fuel assembly	2.76

2.3. 수중 핵연료집합체와 유동관의 유한요소모델

본 연구에서는 참고문헌 [2]에서 개발한 공기중 핵연료집합체와 유동관의 3-D 유한요소모델을 기본으로 하여 수중 핵연료집합체의 2-D 유한요소모델을 개발하였다.

그림 3 (a)는 개발된 수중 18봉 핵연료집합체와 원형 유동관의 유한요소모델을 나타내고 있으며, 그림 3 (b)는 수중 36봉 핵연료집합체와 육각형 유동관의 유한요소모델을 나타내고 있다.



(a) 18-element fuel assembly and round flow tube (b) 36-element fuel assembly and hexagonal flow tube

Fig. 3 Finite element models of the in-water fuel assemblies and flow tubes

그림 3에서 관찰할 수 있듯이 핵연료집합체의 2-D모델에서는 top guide spring의 방향성을 고려하기 위하여 top guide spring만을 실제 형상대로 모델링하며, 나머지는 2-D beam요

소로 모델링하였다. 특히 원형 및 육각형 유동관은 shell 요소로 모델링하였으며, 핵연료 집합체 top guide spring의 방향성을 적절하게 고려하기 위하여 근사적인 3-D 모델링을 수행하였다.

또한 수중 핵연료집합체의 유한요소모델을 개발하기 위해서 유한요소모델의 각 절점에 동적유체질량을 분포시키는 방법을 이용하였다. 동적유체질량은 표 3의 값을 사용하였으며, 동적유체질량을 고르게 분포시키기 위하여 각 절점의 간격을 가급적 동일하게 모델링하였다.

3. 핵연료집합체의 진동특성 분석

하나로 핵연료집합체의 수중 진동특성을 규명하기 위해 상용프로그램인 ANSYS[7]를 사용하여 개발된 수중 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행하였다. 실제로 핵연료집합체가 장전되는 유동관의 하단부는 고정되어 있으므로, 이를 고려하기 위해 유동관 하단부의 병진 및 회전운동 자유도를 구속하여 모달해석을 수행하였다.

3.1 수중 18봉 핵연료집합체의 모달해석

수중 18봉 핵연료집합체의 모달해석은 ANSYS의 Block Lanczos 법을 사용하였다. 이 방법은 메모리를 많이 차지하는 단점이 있지만 빠른 시간내에 정확한 결과를 주는 장점이 있다.

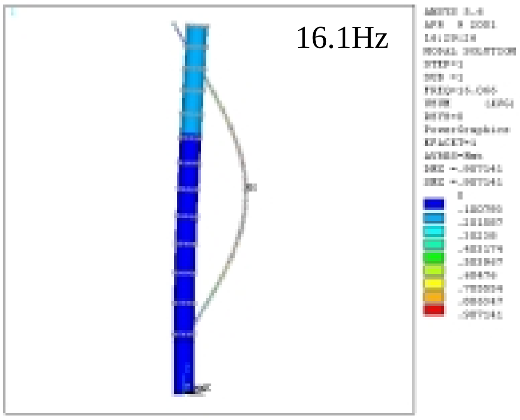
그림 4는 원형 유동관에 장전된 상태에서 모달해석을 통하여 구한 수중 18봉 핵연료집합체의 고유진동수 및 모드형상을 나타내고 있다. 그림 4를 관찰해보면 유동관에 장전된 핵연료집합체는 세장비가 큰 구조물이므로, 고유진동수 중 최저주파수를 갖는 진동모드는 굽힘모드(bending mode) 임을 관찰할 수 있으며 이에 해당하는 고유진동수는 16.1Hz임을 관찰할 수 있다. 또한 그림 4에서 근접한 주파수에서 굽힘진동모드들이 쌍으로 존재함을 확인할 수 있다. 이는 x-y 평면상에서 핵연료집합체의 x-y 평면상에서 대칭 구조를 갖기 때문에 두개의 진동모드가 근접한 고유진동수를 갖는 것으로 판단할 수 있다.

표 4는 모달해석을 통해 구한 18봉 핵연료집합체의 고유진동수와 실험을 통해 구한 고유진동수[8] 및 참고로 공기중에서의 모달해석 결과[2]를 나타내고 있다. 표 4를 관찰해 보면 모달해석을 통해 구한 수중 유한요소모델의 1차 고유진동수가 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이를 통해 동적유체질량의 산정이 매우 효과적이며, 수중 18봉 핵연료집합체 유한요소모델의 타당성을 검증할 수 있다.

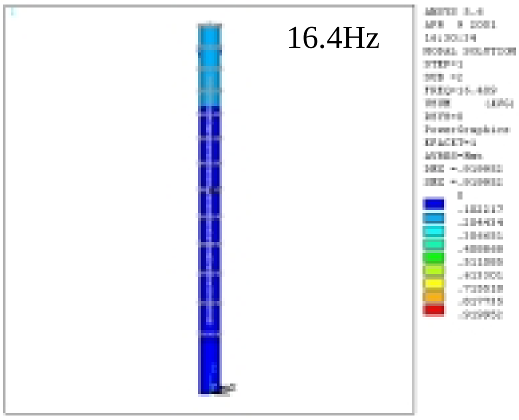
모달해석을 통하여 구한 수중 및 공기중에서의 18봉 핵연료집합체의 고유진동수를 비교해 보면 수중에서의 고유진동수가 공기중 고유진동수에 비해 낮음을 알 수 있다. 즉 1차 고유진동수의 경우 공기중에서는 26.4Hz를, 수중에서는 16.1Hz를 나타내고 있으며, 수중에서의 고차 고유진동수도 공기중에 비해 낮아짐을 알 수 있다.

Table 4 Natural frequencies of the in-water 18-element fuel assembly

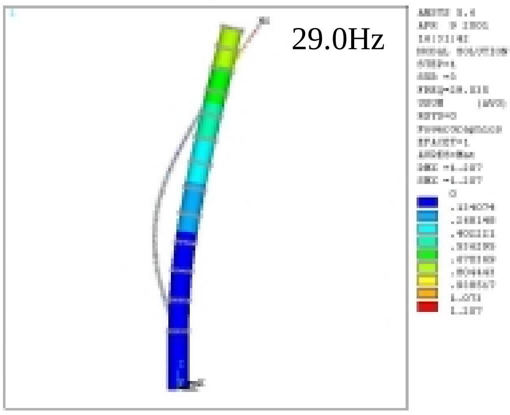
	Natural frequency (Hz)
Modal analysis(in-water)	16.1(1st), 16.4(2nd), 29.0(3th), 30.8(4th), 63.0(5th), 63.1(6th)
Experiment(in-water)[8]	16.0, 26.5
Modal analysis(in-air)[2]	26.4(1st), 29.9(2nd), 96.9(5th), 98.7(6th)



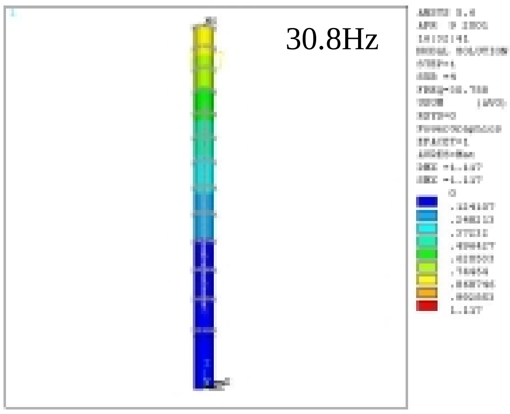
(a) 1st mode



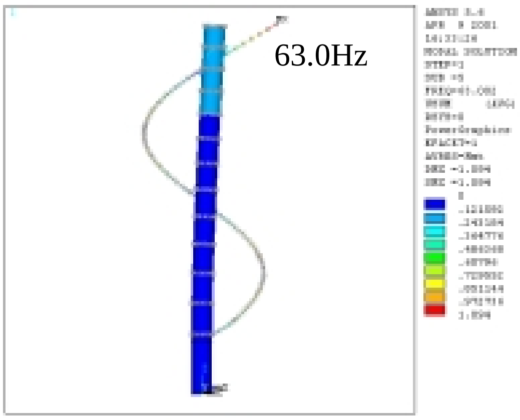
(b) 2nd mode



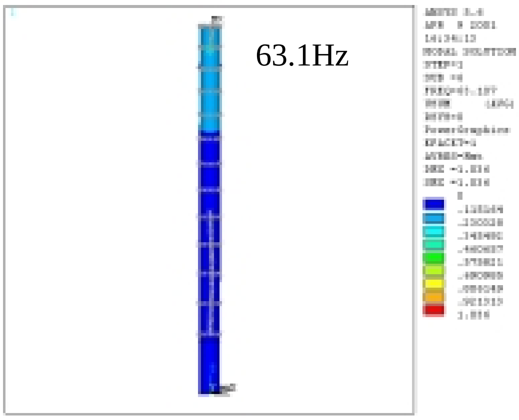
(c) 3th mode



(d) 4th mode



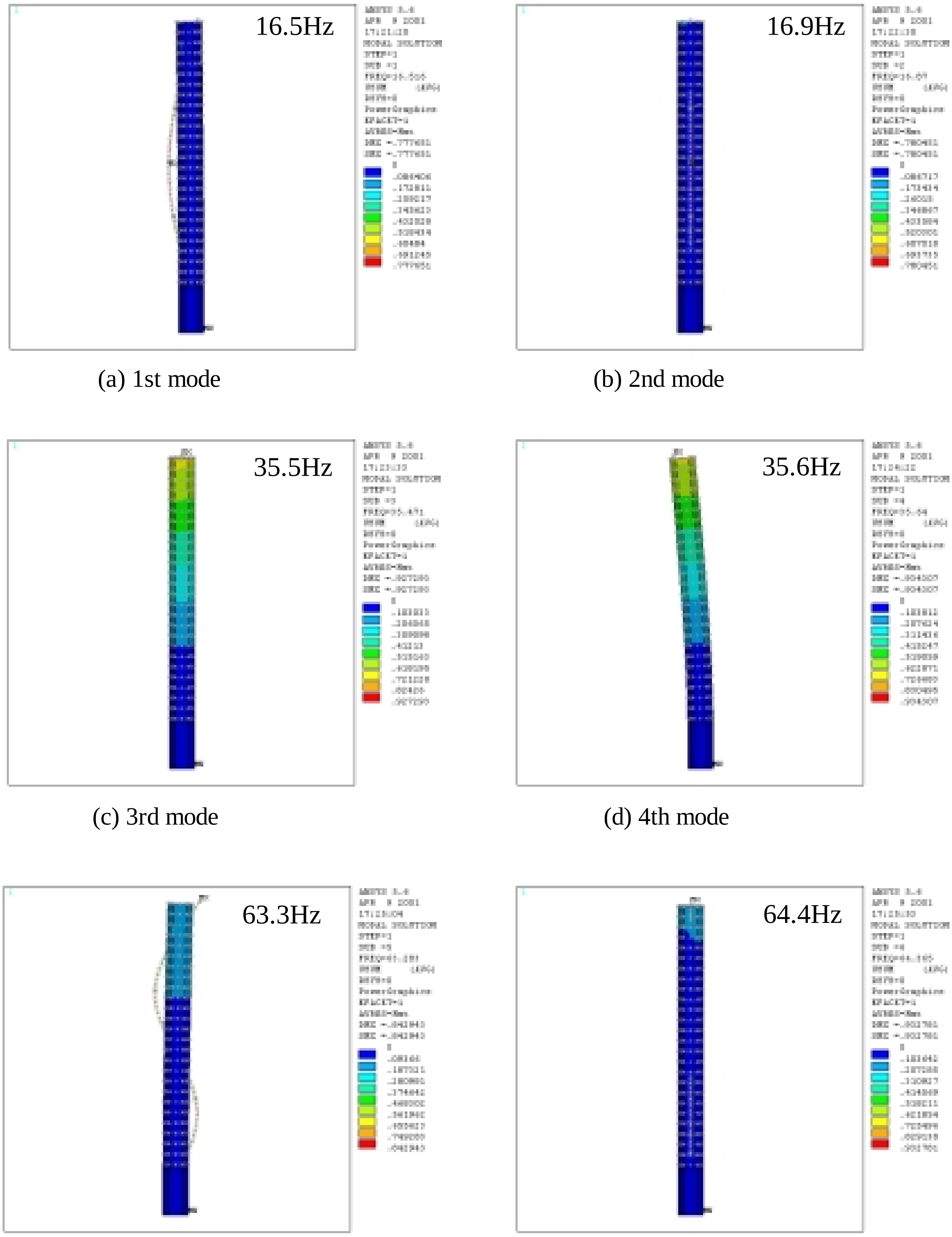
(e) 5th mode



(f) 6th mode

Fig. 4 Natural frequencies and mode shapes for the in-water 18-element fuel assembly

이는 유동관 및 핵연료집합체와 접하고 있는 유체가 유동관 및 핵연료집합체와 함께 동적 거동함으로 인해 동적유체질량에 해당하는 만큼 질량이 증가하는 효과가 발생하는 반면에 유체에 의한 강성 증가의 효과는 무시할 만하여 고유진동수가 낮아진 것으로 판단할 수 있다.



(a) 1st mode (b) 2nd mode

(c) 3rd mode (d) 4th mode

(e) 5th mode (f) 6th mode

Fig. 5 Natural frequencies and mode shapes in-water 36-element fuel assembly

3. 2. 수중 36봉 핵연료집합체의 모달해석

그림 5는 ANSYS를 이용하여 육각형 유동관에 장전된 수중 36봉 핵연료집합체의 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행한 결과를 나타내고 있으며, 표 5는 모달해석을 통해 구한 고유진동수와 실험을 통해 구한 고유진동수[8] 및 공기중에서의 모달해석 결과[2]를 함께 나타내고 있다.

그림 5를 관찰해보면 18봉 핵연료집합체의 경우와 마찬가지로 36봉 육각형 유동관에 장전된 핵연료집합체의 가장 낮은 진동모드는 굽힘모드임을 관찰할 수 있으며 근접한 주파수에서 굽힘진동모드들이 쌍으로 존재함을 확인할 수 있다.

표 5를 관찰해 보면 모달해석을 통해 구한 수중 36봉 핵연료집합체의 1차 고유진동수가 실험치와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이를 통해 동적유체질량의 산정이 매우 효과적이며, 수중 36봉 핵연료집합체 유한요소모델의 타당성을 검증할 수 있다. 또한 수중 18봉 핵연료집합체의 경우와 마찬가지로 동적유체질량 증가로 인해 공기중에서의 고유진동수에 비해 수중에서의 고유진동수가 낮음을 관찰할 수 있다.

Table 5 Natural frequencies of the in-water 36-element fuel assembly

	Natural frequency(Hz)
Modal analysis(in-water)	16.5(1st), 16.9(2nd), 35.5(3rd), 35.6(4th), 63.3(5th), 64.4(6th)
Experiment(in-water)[8]	16.5, 28.0
Modal analysis(in-air)[2]	27.7(1st), 29.5(2nd), 98.4(5th), 103.5(6th)

4. 결 론

수중에서의 하나로 핵연료집합체와 유동관의 진동특성 규명을 위하여 동적유체질량을 고려한 핵연료집합체와 유동관의 유한요소모델을 개발하고 이에 대한 진동특성 해석을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 수중에서 유동관에 장전된 핵연료집합체의 모달해석 결과 수중 18봉 및 36봉 핵연료집합체의 기본진동모드는 각각 고유진동수가 16.1Hz 및 16.5Hz인 굽힘모드임을 확인할 수 있었다.

2) 개발된 수중 핵연료집합체 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 모달해석을 통하여 구한 고유진동수들을 실험을 통해 구한 고유진동수와 비교하였다. 그 결과 유한요소모델에 대한 모달해석을 통해 구한 저차 고유진동수들이 실험치와 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 동적유체질량 산정이 타당함을 알 수 있었다.

3) 개발된 유동관을 포함한 핵연료집합체의 유한요소모델들은 핵연료집합체 설계변경시 진동특성 및 응력해석을 위한 기본 모델로 활용하고, 향후 원자로구조물의 유한요소모델과 조합하여 핵연료집합체와 원자로구조물사이의 동적상관관계를 분석하는데 활용할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 한국원자력연구소의 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

[1] 정승호, 김태룡, 박진호, 박진석, 류정수, “KMRR 원자로구조물 및 일차냉각계통 배관의 진동시험,” KAERI/ RR-1417/94, 한국원자력연구소, 1994.

[2] 류정수, 박진호, 우종섭, 윤두병, 전병진 “하나로 핵연료집합체의 공기중 진동특성 분석,” 한국원자력학회 2001 추계학술대회 논문집, 2001.

[3] S.S. Chen and H. Chung, “Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass; Part I: Circular Cylindrical Structures,” ANL-CT-76-45, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1976.

[4] H. Chung and S.S. Chen, “Design Guide for Calculating Hydrodynamic Mass; Part II: Non-Circular Cylindrical Structures,” ANL-CT-78-49, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1978.

[5] 류정수, 조영갑, 김두기, 박진호, 우종섭, “하나로 유동관에 대한 동적유체질량 평가,” KAERI/TR-1584/2000, 한국원자력연구소, 2000.6

[6] 류정수, 조영갑, 김두기, 박진호, 우종섭, “Assessment for Hydrodynamic Masses of HANARO Flow Tubes,” 한국원자력학회 2000 춘계학술대회 논문집, 2000.

[7] ANSYS 5.5 User’s Manual.

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