2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 원자로구조물의 진동특성 분석

Vibration Characteristic Analysis for HANARO Reactor Structure

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

요 약

하나로 원자로구조물의 진동특성을 규명하기 위하여 수중 및 공기중 원자로구조물의 유한요소모델을 개발하고 이에 대한 모달해석을 수행하였다. 모달해석 결과 수중 원자로구조물의 기본고유진동수는 17.7Hz이며, 이 값은 공기중 원자로구조물의 기본고유진동수인 34.9Hz의 반 정도임을 알 수 있었다. 또한 이 결과는 AECL 해석 결과인 17.46Hz와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 원자로구조물과 핵연료집합체와의 동적상관관계를 규명하기 위하여 핵연료집합체를 포함한 수중 조합모델을 개발하고 모달해석을 수행하였으며, 진동특성분석 결과로부터 핵연료집합체와 원자로구조물간에는 서로 공진현상이 없는 것을 확인할 수 있었다. 개발된 수중 원자로구조물의 3차원 모델은 원자로구조물의 설계변경시 진동특성 및 응력해석을 위한 기본 모델로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

The objective of this study is to investigate the vibration characteristic of the HANARO reactor structure. For this purpose, the in-air and in-water finite element models of the reactor structure were developed and their modal analyses were carried out. The fundamental natural frequency of the in-water reactor structure was obtained as 17.7Hz that is approximately the half of the natural frequency of the in-air reactor structure, 34.9Hz. This natural frequency agree well with the analysis result(17.46Hz) of the AECL. For investigating the dynamic correlation between the fuel assembly and the reactor structure, the in-water reactor model including the fuel assemblies was developed, and its modal analysis was performed. The analysis results demonstrate that there is no resonance between the fuel assemblies and the reactor structure. The developed 3-D model of the in-water reactor structure will be used as a basic model for the dynamic characteristic and stress analysis when it is necessary to modify the design of the reactor structure.

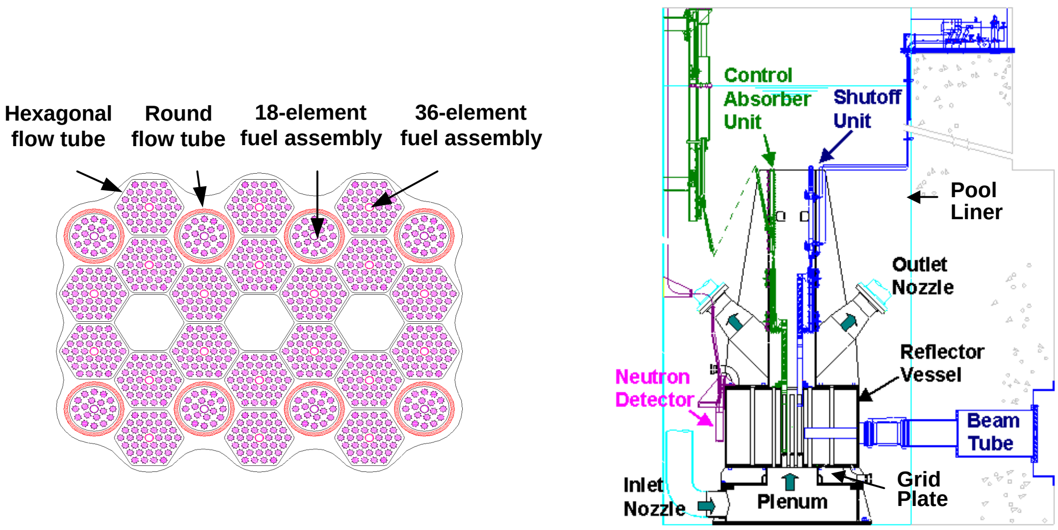
1. 서 론

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 이용되고 있다.

Fig. 1은 경수로 채워진 수조 내부에 위치한 하나로 원자로구조물을 나타내고 있으며, 원자로구조물은 유입공동(inlet plenum), 그리드판(grid plate), 반사체용기(reflector vessel) 및 침니(chimney), 유동관(flow tube) 등으로 구성되어 있다.

하나로 운전중 발생하는 열은 1차 냉각계통에 의해 공급되는 냉각수에 의해 제거되며, 이러한 냉각수는 입구노즐(inlet nozzle)로부터 유입된 후 유입공동, 그리드판을 거쳐 유동관과 핵연료집합체 사이를 통과한 후 침니와 연결된 유출관을 통해 배출된다. 이러한 냉각수 유동은 원자로구조물 및 핵연료집합체에 유체기인진동(fluid induced vibration)을 유발할 수 있으며, 또한 지진하중을 받을 경우에도 원자로구조물 및 핵연료집합체에 진동이 발생할 가능성이 있다.

냉각수 유동이나 지진하중을 받을 때 원자로구조물 및 핵연료집합체의 구조건전성을 검증하기 위해서는 우선 원자로구조물과 핵연료집합체의 진동특성을 명확하게 규명하는 것이 필요하다. 그러나 AECL이 수행한 원자로구조물에 대한 내진해석 보고서[1]에서는 핵연료집합체를 집중질량으로만 고려하여 원자로구조물의 진동특성해석을 수행한 바 있다. 참고문헌 [2]와 [3]에서는 원자로구조물과 핵연료집합체와의 동적상관관계를 연구하기 위해 먼저 핵연료집합체의 유한요소모델을 개발하고 이에 대한 모달해석을 수행하여 공기중 및 수중에서 핵연료집합체의 진동특성을 분석하였다.



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

Fig. 1 Reactor Structure of HANARO

본 연구의 목적은 하나로 원자로구조물의 진동특성을 규명하고, 원자로구조물과 핵연료집합체 사이의 동적상관관계를 분석하는 것이다. 이를 위하여 공기중 및 수중 원자로

구조물의 3-D 유한요소모델을 개발하고, 이에 대한 모달해석을 통하여 공기중 및 수중에서의 원자로구조물의 진동특성을 분석한다.

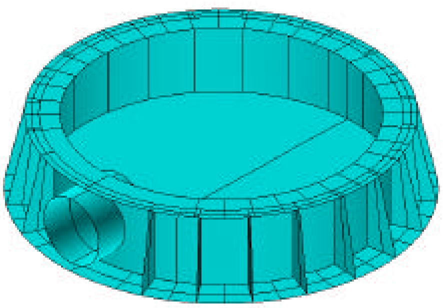
또한 개발된 수중 원자로구조물의 유한요소모델과 참고문헌 [3]에서 개발된 수중 핵연료집합체의 유한요소모델을 결합하여 수중 조합모델을 개발하고 이에 대한 모달해석을 수행하여 원자로구조물과 핵연료집합체사이의 동적상관관계를 분석한다.

2. 공기중 원자로구조물의 진동특성 분석

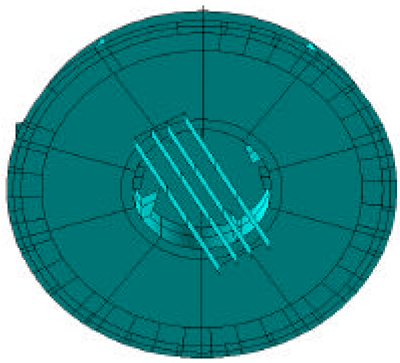
2.1. 공기중 원자로구조물의 3-D 유한요소모델

원자로구조물은 유입공동, 그리드판, 반사체용기, 침니 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 원자로구조물의 유한요소모델을 개발하기 위하여 원자로구조물을 구성하는 각 부분의 고체모델(solid model)을 작성하고, 이를 ANSYS[4] SOLID45, SHELL63 및 BEAM44 요소로 분할하여 유한요소모델을 구성하였다. 그 다음 각 부분구조물의 유한요소모델을 결합하여 원자로구조물 전체의 유한요소모델을 구성하는 방법으로 모델링을 수행하였다. 이때 각 부분구조물을 결합할 때 접점에서는 같은 절점(node)을 공유해야 하므로 이를 고려하여 요소분할을 수행하였다.

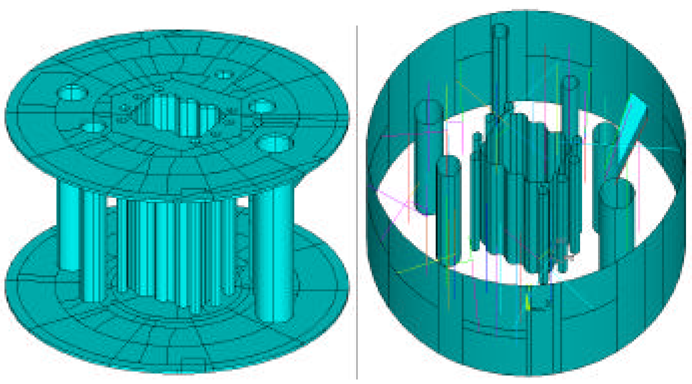
Fig. 2와 3은 각각 원자로구조물을 구성하는 각 부분구조물의 고체모델과 유한요소모델을 나타내고 있다.



(a) Inlet plenum



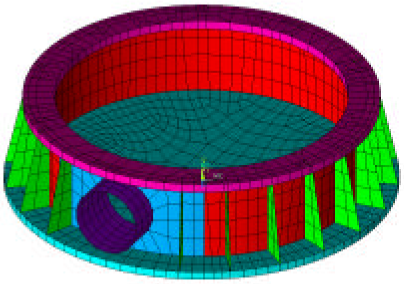
(b) Grid plate



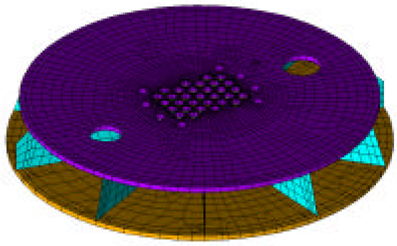
(c) Reflector vessel

(d) Chimney

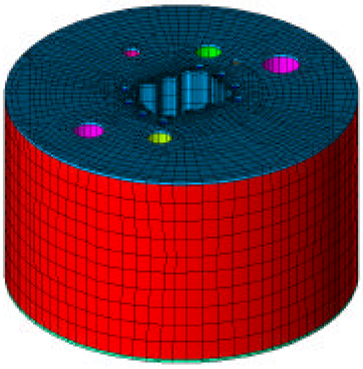
Fig. 2 Solid models of the reactor structure



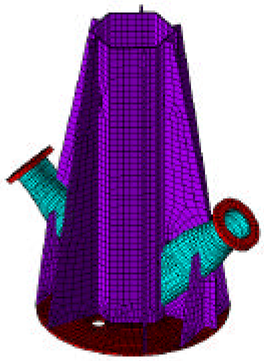
(a) Inlet plenum



(b) Grid plate



(c) Reflector vessel



(d) Chimney

Fig. 3 Finite element models of the reactor structure

Fig. 4는 유입공동, 그리드판, 반사체용기 및 침니의 유한요소모델을 결합하여 만든 원자로구조물의 3-D 유한요소모델을 나타내고 있으며, 원자로구조물 유입공동의 하단부가 원자로 수조바닥에 앵커볼트로 고정되어 있으므로, 이를 만족시키기 위하여 유입공동 바닥의 6 자유도(DOF)를 모두 고정하였다.

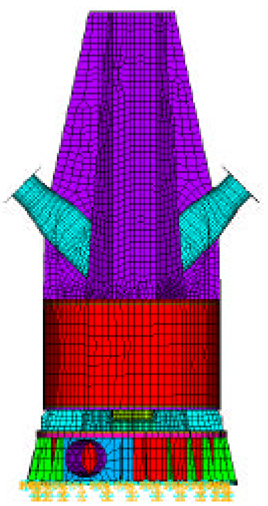


Fig. 4 Finite element model of the reactor structure

2.2 공기중 원자로구조물의 모달해석

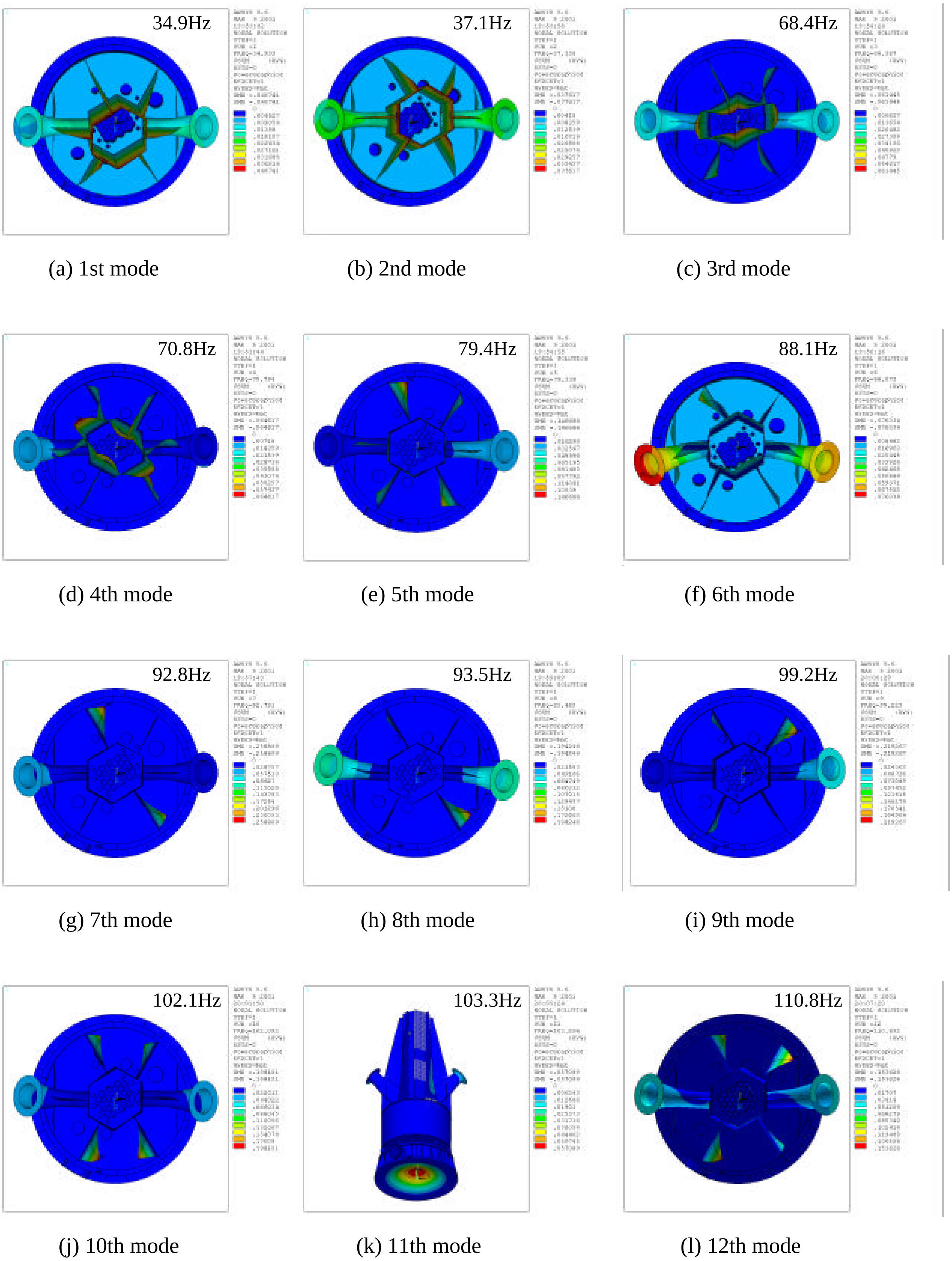
원자로구조물의 진동특성을 규명하기 위해 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 개발된 원자로구조물의 3-D 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행하였으며, 이를 통하여 원자로구조물의 진동특성을 대표하는 고유진동수와 모드형상을 구할 수 있었다.

Table 1은 모달해석을 통하여 구한 공기중 원자로구조물의 80개 진동모드의 고유진동수를 정리하여 나타낸 것이며, Fig. 5는 공기중 원자로구조물의 12개 진동모드의 모드형상을 나타내고 있다.

Fig. 5(a)를 관찰해 보면 원자로구조물의 고유진동수중 최저주파수를 갖는 진동모드인 기본모드(fundamental mode)는 원자로구조물의 수평방향 굽힘모드(bending mode)임을 관찰할 수 있으며 이에 해당하는 고유진동수는 34.9 Hz 임을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 5(b)를 관찰해 보면 2번째 모드의 고유주파수는 37.1 Hz이며, 이에 해당하는 진동모드는 첫번째 진동모드와 방향이 다른 원자로구조물의 수평방향 굽힘모드임을 관찰할 수 있다. Fig. 5(c)를 관찰해 보면 3번째 모드는 침니 구조물의 쉘(shell) 1차 진동모드이며, 68.4 Hz의 고유진동수인 것을 알 수 있고, Fig. 5(d)를 관찰해 보면 4번째 모드도 70.8 Hz의 고유진동수를 갖는 침니 구조물의 쉘(shell) 모드임을 관찰할 수 있다. 나머지 모드 형상은 원자로구조물의 고차 모드를 보여주고 있다.

Table 1 Natural frequencies for the in–air reactor structure

Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
1	34.93	21	151.65	41	234.41	61	307.07
2	37.14	22	153.39	42	236.40	62	327.20
3	68.39	23	159.64	43	238.31	63	328.17
4	70.79	24	167.45	44	247.73	64	332.67
5	79.34	25	178.52	45	249.01	65	339.50
6	88.07	26	178.93	46	251.72	66	345.24
7	92.79	27	181.91	47	254.64	67	345.80
8	93.47	28	186.15	48	256.87	68	349.86
9	99.22	29	188.79	49	258.05	69	353.42
10	102.09	30	192.08	50	261.33	70	357.79
11	103.27	31	193.22	51	263.81	71	368.42
12	110.83	32	202.43	52	267.04	72	370.27
13	115.13	33	218.35	53	271.69	73	375.88
14	118.58	34	218.57	54	271.79	74	378.08
15	122.52	35	220.45	55	277.34	75	380.94
16	127.41	36	224.96	56	279.28	76	382.62
17	132.46	37	227.14	57	285.41	77	389.93
18	142.07	38	230.02	58	288.11	78	392.48
19	144.83	39	231.58	59	295.56	79	397.27
20	148.88	40	232.44	60	305.97	80	400.60



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

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

(g) 7th mode (h) 8th mode (i) 9th mode

(j) 10th mode (k) 11th mode (l) 12th mode

Fig. 5 Natural frequencies and mode shapes of the in-air reactor structure

3. 수중 원자로구조물의 진동특성 분석

3.1. 수중 원자로구조물의 3-D 유한요소모델

수중에 잠긴 원자로구조물의 동특성 해석을 수행할 경우에는 유체와 원자로구조물 사이의 동적 상호작용을 고려하여야 한다. 해석상 유체가 구조물의 동적거동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 유체에 의해 원자로구조물에 작용하는 동적유체질량을 산정한 후, 구조물의 질량에 동적유체질량을 더하여 등가질량으로 사용할 수 있다[5~7].

본 연구에서는 수중 원자로구조물의 유한요소모델을 개발하기 위해서 2.1절에서 개발된 공기중 원자로구조물의 유한요소모델에 동적유체질량을 추가로 부가하는 방법을 사용하였다. 원자로구조물에 부가되는 동적유체질량은 AECL 자료[1]를 참조하여 정하였다. Table 2는 원자로구조물 각 부분에 작용하는 동적유체질량을 정리하여 나타내고 있다.

Table 2 Hydrodynamic mass properties of the in-water reactor structure

Component	No. of items	Direction	Hydrodynamic mass (kg)
Chimney column	1	x	2472.7
		z	4009.9
Chimney base plate	1	y	1290.47
Chimney four stiffeners	4	x	963.21
		z	963.21
Chimney two stiffeners	2	z	386.95
Chimney cross stiffeners	2	x	633.4
Chimney outlet nozzle	2	x	393.93
		y	393.93
		z	557
Reflector vessel outer shell	1	x	8426.64
		z	8210.62
Reflector vessel lower plate	1	y	1929.92
Reflector vessel upper plate	1	y	1886.27
Reflector vessel inner shell	1	x	505.98
		z	485.36
Grid plate lower plate	1	y	834.67
Plenum lower plate	1	y	1013.76
Plenum upper plate	1	y	1155.8
Plenum outer shell	1	x	4030.99
		z	3851.67
Grid plate circular wall	1	x	310.36
		z	302.57
Water in IP1-IP14, IP16, IP17	16	x, y, z	3.72 (each)
Water in IP15	1	x, y, z	3.72
Water in OR1-OR8	8	x, y, z	3.72 (each)
Water in HTS	1	x, y, z	10.35
Water in NTD1	1	x, y, z	50.1
Water in NTD2	1	x, y, z	33.5
Water in CNS	1	x, y, z	26.5
Water in LH	1	x, y, z	23.3

여기서 침니의 유출관 방향이 수평 x 방향, 다른 방향이 수평 z 방향이고 나머지 y 방향

은 수직 방향이다. Fig. 6은 침니, 반사체용기, 유입공동에 분포하는 동적유체질량의 분포를 보여주고 있다.

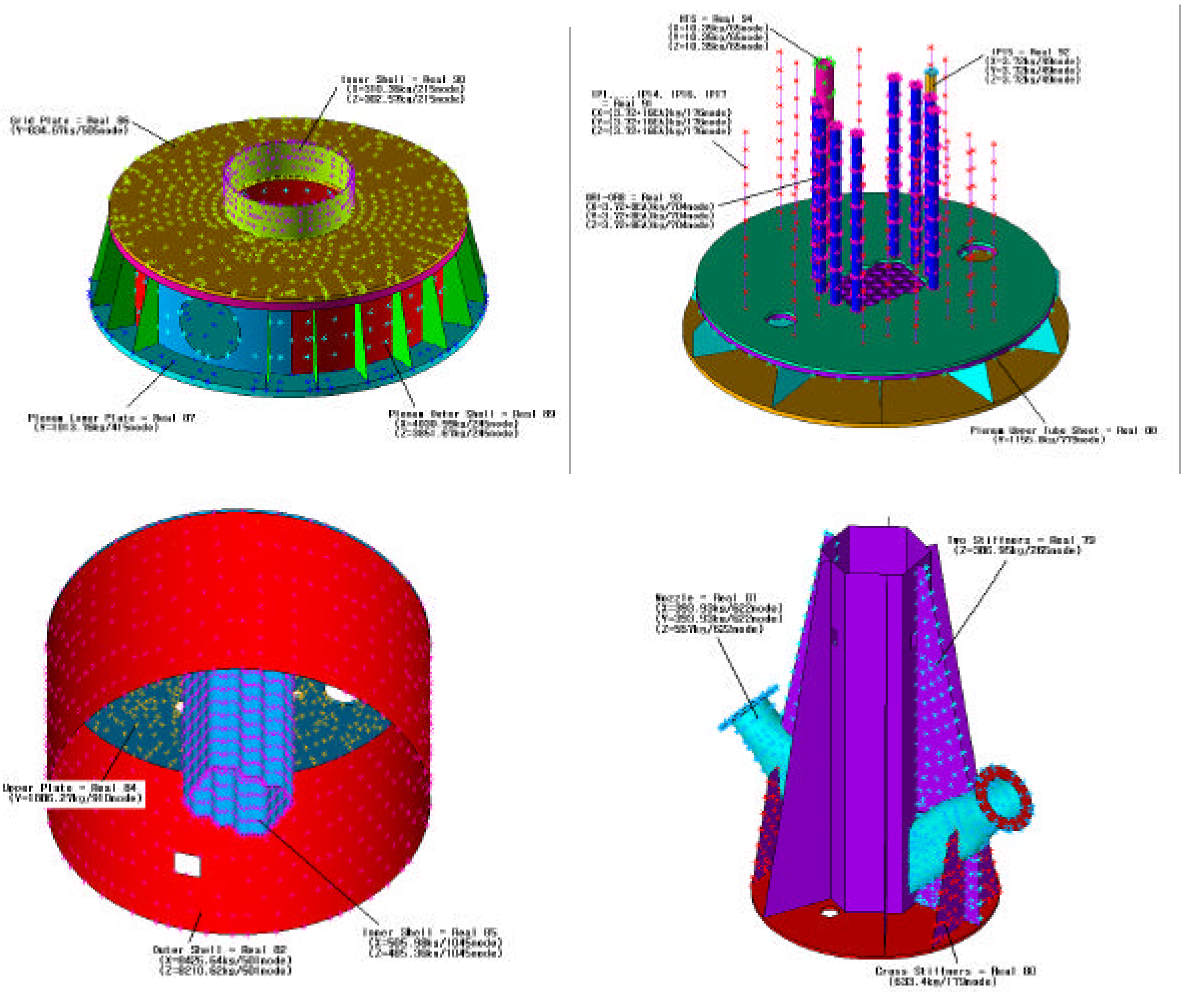


Fig. 6 Hydrodynamic masses of the reactor structure

3.2 수중 원자로구조물의 모달해석

개발된 수중 원자로구조물의 3-D 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행하여 수중 원자로구조물의 진동특성을 대표하는 고유진동수와 모드형상을 구하였다.

Table 3은 수중 원자로구조물의 모달해석을 통해 구한 80개 고유진동수를 나타내고 있으며, Fig. 7은 수중 원자로구조물의 12개 진동모드의 모드형상 및 고유진동수를 나타내고 있다.

Fig. 7(a)를 관찰해 보면 수중 원자로구조물의 기본진동모드는 공기중 원자로구조물의 경우와 마찬가지로 원자로구조물의 굽힘진동모드임을 관찰할 수 있으며, 1차 고유진동수는 17.67 Hz임을 알 수 있다. 이를 공기중 고유진동수, 34.93 Hz와 비교해 보면 공기중에 비하여 수중 고유진동수가 약 반으로 감소함을 알 수 있다. 이는 원자로구조물과 접하고 있는 유체가 원자로구조물의 각 부분들과 함께 운동함으로 인해 동적유체질량에 해당하는 만큼 원자로구조물의 질량이 증가한 효과가 발생하여 고유진동수가 낮아진 것으로 판

단할 수 있다. 또한 Fig. 7에서 다른 진동모드들도 관찰해 보면 기본 진동모드와 마찬가지로 공기중에 비해 고유진동수가 낮아졌음을 확인할 수 있다.

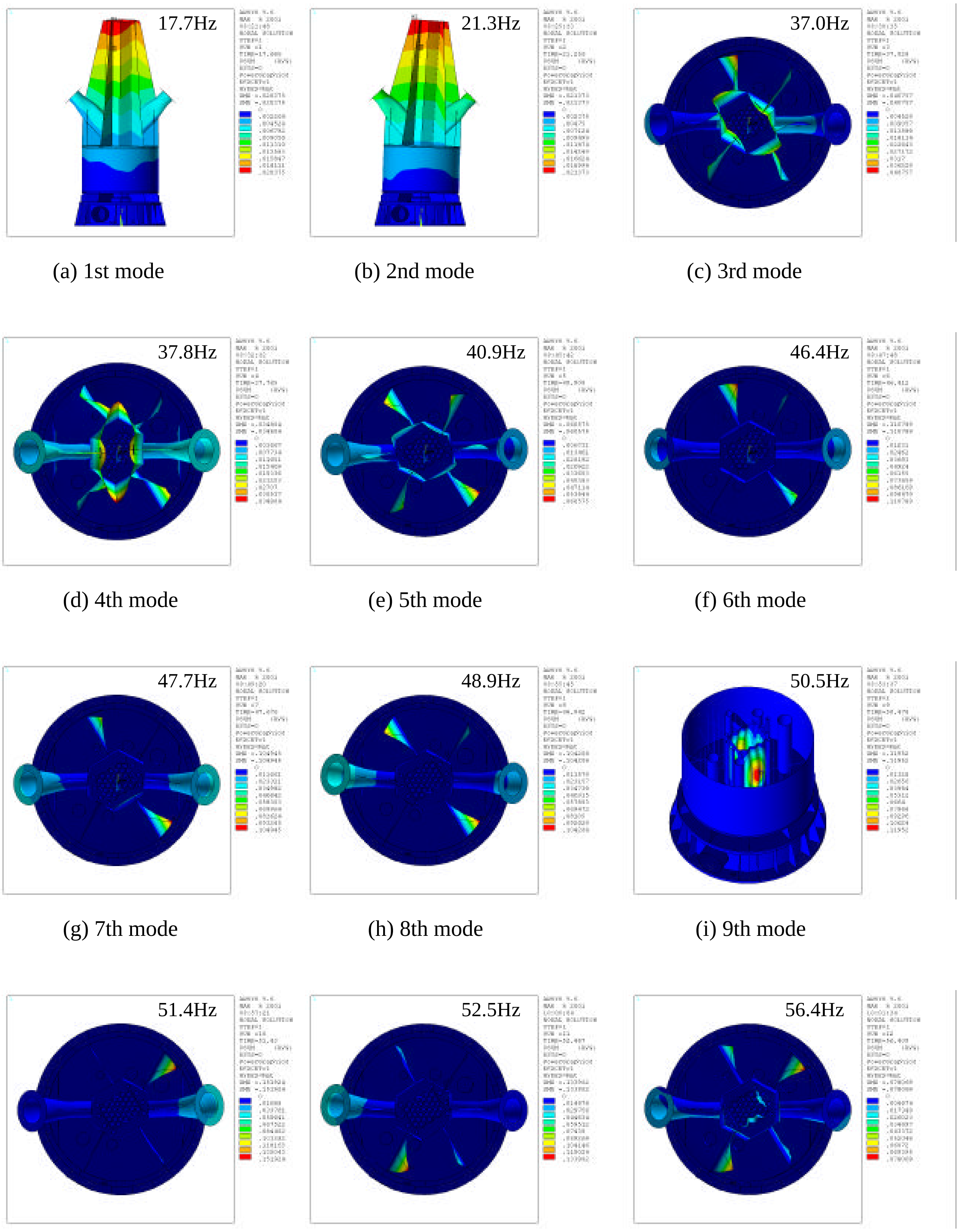
Table 3 Natural frequencies for the in–water reactor structure

Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)	Mode	Frequency (Hz)
1	17.67	21	78.51	41	112.15	61	164.51
2	21.26	22	80.80	42	113.61	62	167.99
3	37.03	23	82.47	43	114.08	63	170.04
4	37.79	24	83.44	44	115.29	64	170.93
5	40.91	25	84.22	45	117.89	65	175.36
6	46.41	26	86.91	46	123.97	66	176.87
7	47.68	27	88.83	47	127.63	67	179.75
8	48.94	28	90.39	48	129.41	68	181.71
9	50.48	29	91.74	49	134.84	69	184.51
10	51.43	30	93.87	50	136.37	70	186.68
11	52.49	31	94.76	51	137.35	71	187.62
12	56.41	32	95.41	52	140.95	72	192.10
13	59.85	33	96.47	53	148.63	73	194.95
14	60.54	34	97.23	54	149.85	74	196.89
15	62.74	35	98.46	55	152.34	75	197.65
16	65.98	36	100.85	56	152.39	76	202.25
17	71.29	37	103.74	57	155.14	77	202.79
18	73.79	38	109.48	58	157.41	78	205.62
19	75.00	39	110.18	59	161.03	79	208.86
20	75.82	40	111.66	60	161.99	80	209.50

Table 4는 AECL에서 구한 고유진동수를 나타내고 있다. Table 3과 Table 4를 비교해 보면 개발된 수중 원자로구조물 유한요소모델에 대한 모달해석을 통하여 구한 1차 고유진동수, 17.67 Hz가 AECL 결과[1]인 17.46 Hz와 잘 일치하고 있으며, 2차 고유진동수가 약간 다른 것은 침니의 보강구조물(stiffener)을 AECL이 실제보다 작게 모델링하였기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 AECL보다 원자로구조물을 자세하게 모델링하였으므로 AECL 보다 많은 진동모드를 추출할 수 있었으며, AECL에서 구한 저차 고유진동수와 본 연구에서 구한 수중 원자로구조물의 고유진동수가 유사하므로 이를 근거로 개발된 수중 원자로구조물의 3-D 유한요소모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

Table 4 Natural frequencies for the in–water reactor structure by AECL[1]

Mode	Frequency(Hz)
1	17.46
2	18.67
3	32.00
4	40.55
5	42.46
6	45.37
7	48.99



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

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

(g) 7th mode (h) 8th mode (i) 9th mode

(j) 10th mode (k) 11th mode (l) 12th mode

Fig. 7 Natural frequencies and mode shapes of the in-water reactor structure

4. 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 수중 조합모델 개발

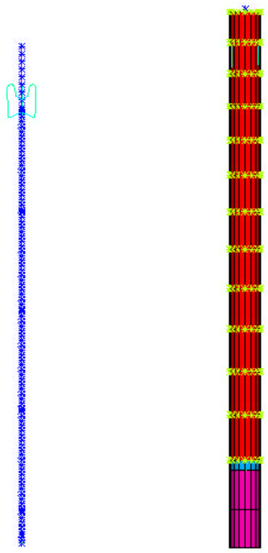
하나로 핵연료집합체와 원자로구조물 사이의 동적 상관관계를 평가하기 위하여 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 수중 조합모델을 개발하고, 동특성 해석을 수행하였다.

4.1. 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 모델링

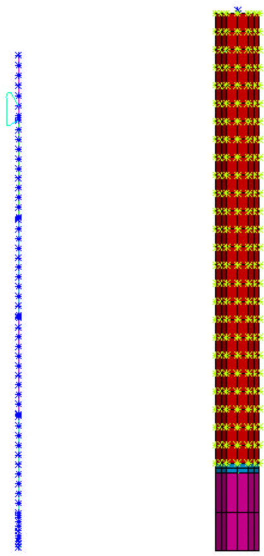
핵연료집합체와 원자로구조물 사이의 동적 상관관계를 분석하려면 2장에서 개발된 원자로구조물의 유한요소모델 외에 핵연료집합체의 유한요소모델이 추가로 필요하다. 참고문헌 [3]에서는 수중에 잠긴 하나로 핵연료집합체에 대한 2-D 및 유동관의 단순화된 3-D 유한요소모델을 개발하였으며, 본 연구에서는 참고문헌 [3]에서 개발된 유한요소모델과 원자로구조물의 유한요소모델을 결합하여, 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 수중 조합모델을 개발하였다.

수중 조합모델에 사용되는 18봉 및 36봉 핵연료집합체는 제한된 컴퓨터 용량을 고려하여, 18봉 핵연료집합체 2개(C4, S3)와 36봉 핵연료집합체 3개(CT, R7, R14)를 수중 조합모델에 포함하였다.

Fig. 8 (a)는 수중 18봉 핵연료집합체와 원형 유동관의 유한요소모델을 나타내고 있으며, Fig. 8 (b)는 수중 36봉 핵연료집합체와 육각형 유동관의 유한요소모델을 나타내고 있다[3].



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



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

Fig. 8 Finite element models of the in-water fuel assemblies and flow tubes

4.2. 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 모달해석

핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 수중 조합모델에 모달해석은 ANSYS[4]를 이용하여 수행하였다. Fig. 9는 핵연료집합체를 포함한 원자로구조물의 24개 진동모드의 모드형상 및 고유진동수를 나타내고 있으며, Table 5는 첫번째부터 40번째까지의 진동모드의

고유진동수를 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 9는 전체 수중 조합모델에 대한 각각의 모드형상을 쉽게 볼 수 있도록 모델의 일부를 나타내었다.

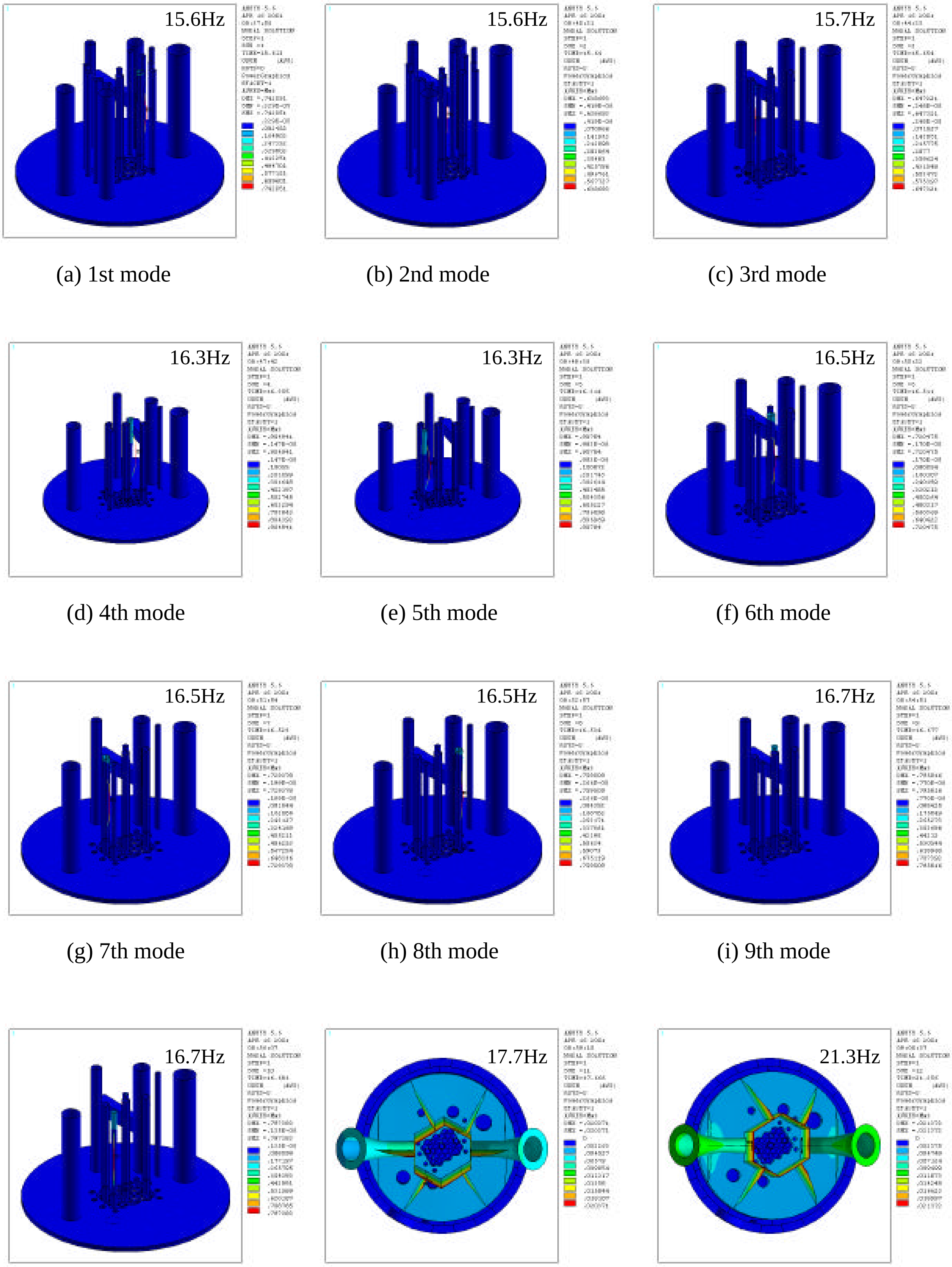
Table 5 Natural frequencies of the in-water reactor structure with fuel assemblies

Mode	Frequency (Hz)	Remark	Mode	Frequency (Hz)	Remark
1	15.613	1st bending of 36-element fuel	21	34.618	2nd bending of 36-element fuel
2	15.640	1st bending of 36-element fuel	22	34.929	2nd bending of 36-element fuel
3	15.654	1st bending of 36-element fuel	23	37.028	1st bending of reactor column
4	16.305	1st bending of 18-element fuel	24	37.786	1st bending of reactor column
5	16.314	1st bending of 18-element fuel	25	40.909	1st bending of reactor column
6	16.511	1st bending of 36-element fuel	26	46.411	1st bending of reactor column
7	16.523	1st bending of 36-element fuel	27	47.675	1st bending of reactor column
8	16.534	1st bending of 36-element fuel	28	48.942	1st bending of reactor column
9	16.677	1st bending of 18-element fuel	29	50.478	bending of inner shell
10	16.681	1st bending of 18-element fuel	30	51.429	1st bending of reactor stiffener
11	17.666	bending of reactor assembly	31	52.486	1st bending of reactor stiffener
12	21.256	bending of reactor assembly	32	56.400	1st bending of reactor stiffener
13	29.273	2nd bending of 18-element fuel	33	58.242	3rd bending of 36-element fuel
14	29.545	2nd bending of 18-element fuel	34	58.503	3rd bending of 36-element fuel
15	32.160	2nd bending of 18-element fuel	35	58.814	3rd bending of 36-element fuel
16	32.372	2nd bending of 18-element fuel	36	59.848	3rd bending of 36-element fuel
17	32.594	2nd bending of 36-element fuel	37	60.538	2nd bending of reactor stiffener
18	32.688	2nd bending of 36-element fuel	38	62.735	bending of inner shell
19	32.783	2nd bending of 36-element fuel	39	64.647	3rd bending of 18-element fuel
20	34.463	2nd bending of 36-element fuel	40	64.894	3rd bending of 18-element fuel

Fig. 9를 관찰해 보면 가장 낮은 주파수를 갖는 진동모드는 36봉 핵연료집합체의 1차 굽힘모드이며, 15.61 Hz의 고유진동수를 가짐을 알 수 있다. 2번째와 3번째 진동모드도 각각 15.64 Hz와 15.65 Hz의 고유진동수를 갖는 36봉 핵연료집합체의 굽힘진동모드임을 관찰할 수 있으며, 4번째와 5번째 진동모드는 16.31 Hz를 갖는 18봉 핵연료집합체의 굽힘진동모드임을 알 수 있다.

Fig. 9에서 첫번째부터 10번째 모드까지는 핵연료집합체들의 두 수평방향의 1차 굽힘모드들이 나타난 후, 원자로구조물의 진동모드가 11번째 모드와 12번째 모드에서 나타났으며, 원자로구조물의 1차 굽힘모드가 발생함을 관찰할 수 있다. 그 다음은 다시 핵연료집합체의 고차모드가 나타난 후, 원자로구조물의 고차 모드가 나타남을 알 수 있었다.

따라서 핵연료집합체와 원자로구조물의 고유진동수 영역은 분리되어 있는 것으로 판단할 수 있으며, 핵연료집합체와 원자로구조물간의 공진현상은 없는 것으로 판단된다



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

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

(g) 7th mode (h) 8th mode (i) 9th mode

(j) 10th mode (k) 11th mode (l) 12th mode

Fig. 9 Natural frequencies and mode shapes of the in-water reactor structure with fuel assemblies(continued)

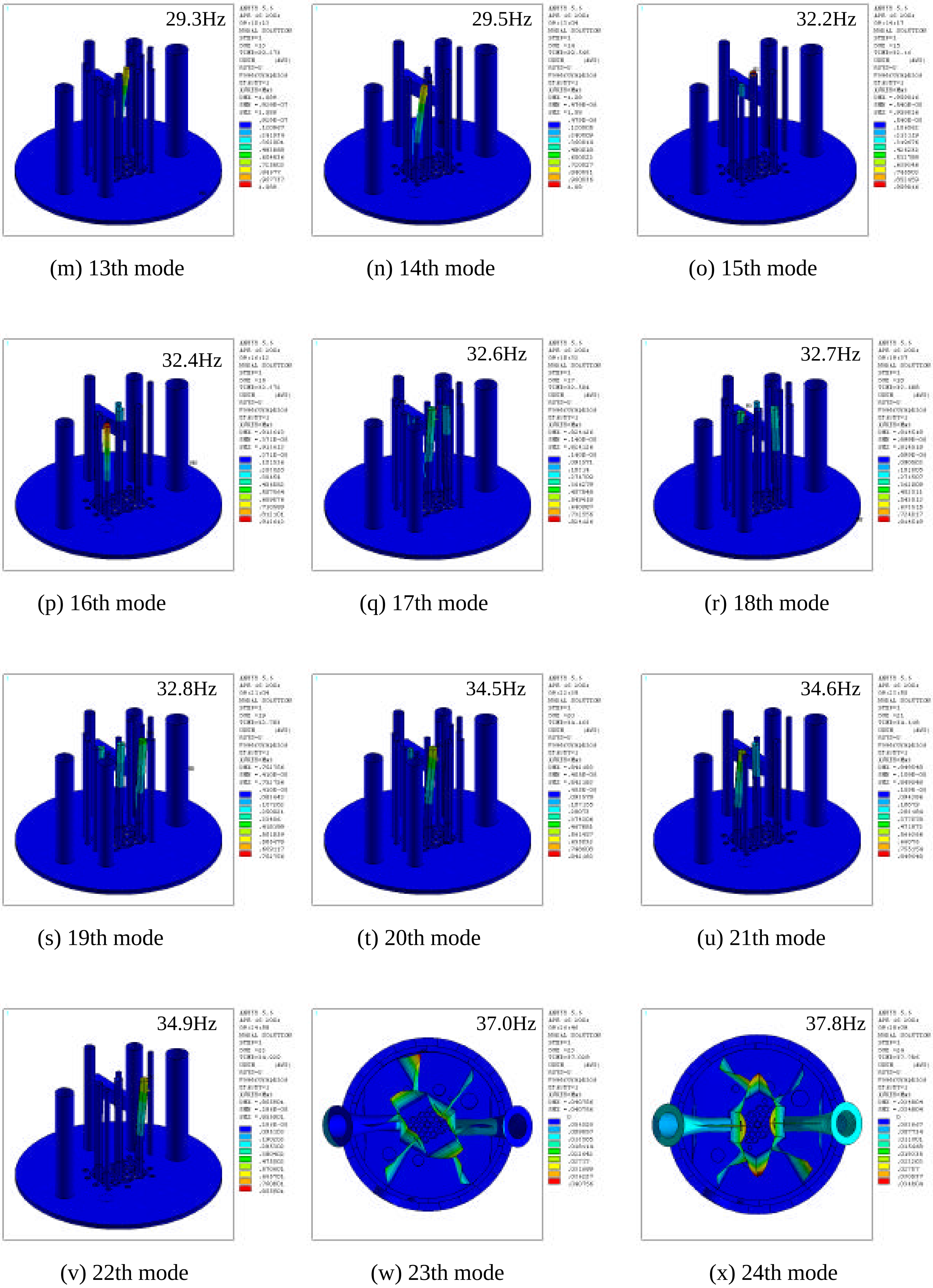


Fig. 9 Natural frequencies and mode shapes of the in-water reactor structure with fuel assemblies

5. 결 론

하나로 원자로구조물의 진동특성을 해석을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 원자로구조물과 핵연료집합체 사이의 동적상관관계를 분석하기 위하여 원자로구조물과 핵연료집합체의 조합모델을 개발하였다.

2) 원자로구조물의 공기중 3-D 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행하였으며 기본진동모드는 고유진동수가 34.9 Hz인 원자로구조물의 굽힘모드임을 확인할 수 있었다.

3) 수중 원자로구조물의 3-D 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행한 결과, 수중 원자로구조물의 기본진동모드는 고유진동수가 17.67 Hz인 굽힘모드임을 확인할 수 있었다. 이 값은 AECL에서 구한 1차 고유진동수와 잘 일치하고, 나머지 고유진동수도 유사하게 나타나 개발된 수중 원자로구조물 유한요소모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

4) 핵연료집합체와 원자로구조물의 동적상관관계를 분석하기 위해 핵연료집합체를 포함하는 원자로구조물의 유한요소모델에 대한 모달해석을 수행하였다. 그 결과 처음부터 10번째 모드까지 핵연료집합체들의 1차굽힘모드들이 나타난 후, 원자로구조물의 진동모드가 발생함을 확인할 수 있었으므로 핵연료집합체와 원자로구조물간의 공진현상은 없는 것으로 판단된다.

5) 개발된 수중 원자로구조물의 3차원 모델은 원자로구조물의 설계변경시 진동특성 및 응력해석을 위한 기본 모델로 활용될 수 있을 것으로 기대된다

감사의 글

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

참고문헌

[1] K.C.Chow, "Seismic Analysis Report of the Reactor Structure Assembly", AECL T.D.S. SR-37-31200-002, Rev1, 1991.

[2] 류정수, 윤두병, 박진호, 우종섭, 전병진, "하나로 핵연료집합체의 공기중 진동특성 분석," 한국원자력학회 2001 추계학술발표회 논문집, 2001.

[3] 류정수, 윤두병, 박진호, 조영갑, 우종섭, "하나로 핵연료집합체의 수중 진동특성 해석," 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 2002.

[4] ANSYS 5.7 User's Manual, ANSYS, inc.

[5] 류정수, 김두기, 박진호, 조영갑, 우종섭, "하나로 유동관에 대한 동적유체질량 평가," 한국원자력학회 2000 춘계학술발표회 논문집, 2000.

[6] 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.

[7] 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.