

모의 핵연료봉의 수중동특성 해석 및 검증실험 Dynamic Characteristics of KALIMER Fuel Rod Mock-up

박진호*·이정환*김봉수*안창기**

Jinho Park, Jeong-Han Lee, Bong-Soo Kim and Chang-Gi Ahn

Key Words : Fuel Rod, Natural Frequency, Mode Shape, Added Mass

ABSTRACT

Vibration characteristics of a fuel rod to be used in KALIMER(Korean Advanced Liquid Metal Reactor) have been estimated through 3-dimensional finite element analysis and verified by experiment. The fundamental natural frequencies are found to be 6 Hz in air and 2.5 Hz in water, respectively. It has been found that in-water natural frequencies of the fuel rod are lower than in-air ones due to the added mass effect of the fluid filled inside the outer cylinder and they further decreases as the gap between the fuel rod and the outer cylinder increases, namely the added mass effect increases as the gap increases(maximum 54%). It has been also shown that the mass of the wire wrap axially coiled around the fuel rod do not affect the natural frequencies.

1. 서 론

모의 핵연료봉 모델의 공기중 및 수중에서의 진동 특성 변화 및 유체가 구조물의 고유진동 주파수에 미치는 영향을 평가하기 위한 자유진동해석을 수행하고 이에 대한 검증시험을 실시하였다.

자유진동해석은 상용코드인 [ANSYS]^[1]를 사용하여 유한요소법으로 해석하였으며, 모델은 간극 선재가 없는 연료봉의 경우와 연료봉에 감겨 있는 간극선재의 질량 효과를 고려한 경우, 그리고 간극선재에 작용하는 인장에 따른 기하중을 포함한 경우에 대하여 공기중 및 수중에서의 동특성 해석을 수행하였다. 이때 유체와 구조물의 상호관계를 정확하게 모사하기 위해서 유체부분에 대해서는 ANSYS의 3차원 유체요소를 적용하였다.

모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성 해석모델의 검증을 위하여 실험규모 모델에 대한 모우드 시험을 수행하였다. 이때 구조물에 대한 진동입력은 충격가진을 사용하였으며, 진동응답은 가속도를 측정하였다.

2. 본 론

2.1 모의 핵연료봉과 유체의 모델링

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 모의 핵연료봉은 네개의 부분으로 나누어져 있는 지지 레일에 조립될 keyway 부분과 모의 핵연료(납), 모의 핵연료를 감싸고 있는 피복관 그리고 피복관 덮개부분으

로 구성되어 있다. Keyway 부분과 피복관 덮개부분은 간극선재(wire wrap)의 시작과 끝나는 지점이기도 하다.

모의 핵연료봉의 피복관은 4 절점 shell 요소(SHELL63)로, 나머지는 8 절점 요소(SOLID45)로 모델화 하였다. 모의 연료봉 주위에 있는 유체부분은 전단계수가 0 이고 적절한 체적탄성계수에 근거하여 3 차원 고체요소(3-D structure solid element)로부터 개발된 요소(FLUID80)를 사용하였으며, 압축성, 점성, 중력의 영향을 고려할 수 있는 요소이다. 모의 핵연료봉 모델의 경계조건은 Fig. 1 에 나와 있으며, Fig. 2 는 유체를 포함한 전체 유한요소 모델이다. 모의 핵연료봉 모델의 윗부분은 레일에 의해 지지되어 있으며 아래부분은 자유단을 가진다^[2].

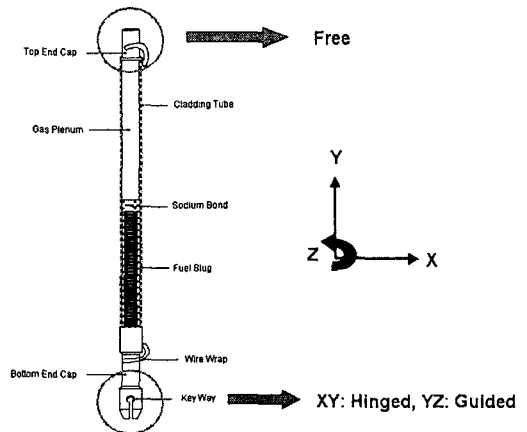


Fig. 1 모의 핵연료봉의 경계조건

* 한국원자력연구소

E-mail : pjh213@kaeri.re.kr

Tel : (042) 868-2915, Fax : (042) 868-2700

** 신화기술정보

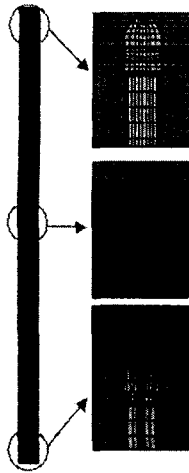


Fig. 2 핵연료봉 및 유체의 유한요소 모델

2.2 공기중에서의 진동모우드 해석

공기중에서 모의 연료봉 모델의 고유진동수와 진동모우드 형상을 구하기 위한 자유진동해석을 수행하였다. 재료는 SUS 304 이며 사용된 물성치는 다음과 같다:

- 탄성계수 (Young' s modulus) $E = 1.95 \times 10^{11}$ Pa
- 프아송비 (Poisson' s ratio) $\nu = 0.3$
- 밀 도 $\rho = 7.9 \times 10^4$ N/m³

여기서는 간극선재 없이 단지 모의 연료봉에 대한 것과 간극선재는 감겨있지만 인장력이 존재하지 않는 경우, 그리고 간극선재에 인장력이 작용하는, 세가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 서로 다른 경계조건에 대한 진동모우드 형상 결과가 Fig. 3 및 Fig. 4 에 나와 있으며, 모우드 형상별 고유진동수는 Table 1 에 요약되어 있다.

간극선재에 인장력이 없는 경우의 고유진동수는 인장력이 가해진 경우에 비하여 동일 모우드 형상에서 약간 높게 나타나며, 간극선재의 질량은 고유진동수 결과에 거의 영향이 없음을 볼 수 있다. 간극선재에 인장이 작용하면 연료봉에는 압축력이 작용하므로 구조물의 강성을 약화시켜 고유진동수가 낮아진 것으로 판단된다. 그리고 간극선재 자체의 유, 무 보다는 간극선재에 대한 인장력의 유, 무가 연료봉의 고유진동수에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수가 있다. Fig. 5 는 간극선재의 유, 무 및 인장력의 유, 무에 따른 고유진동수 변화를 진동 모우드 별로 요약한 결과를 보여준다.

Table 1 공기중 고유진동수

[단위 : Hz]

Mode Number	without wire		with wire (without tension)		with wire (with tension)	
	Hinged-Free	Guided-Free	Hinged-Free	Guided-Free	Hinged-Free	Guided-Free
1st	0.56	-	0.56	-	-	-
2nd	7.40	9.15	7.35	9.17	5.10	6.83
3rd	14.56	16.78	14.47	16.84	12.47	14.86
4th	24.33	27.65	24.18	27.69	22.38	25.81
5th	35.95	39.87	35.74	40.00	34.00	38.26

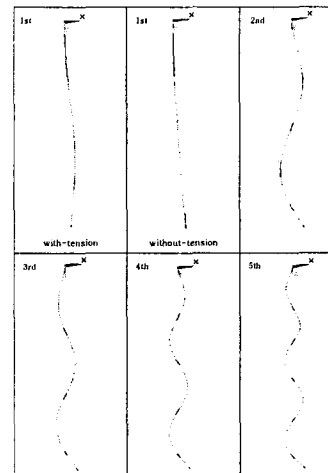


Fig. 3 고유진동 모우드(hinged-free)

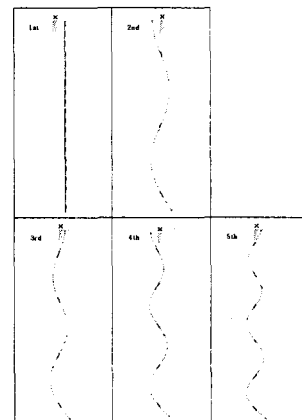
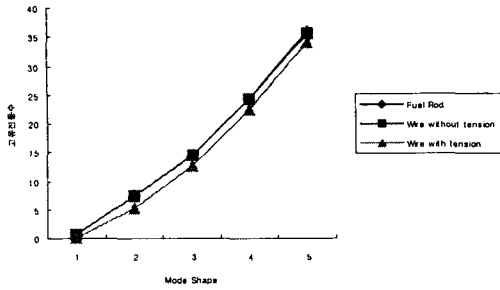
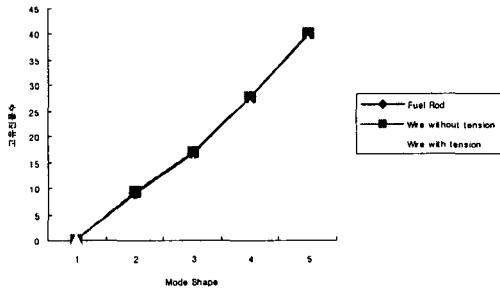


Fig. 4 고유진동 모우드(guided-free)



(a)



(b)

Fig. 5 공기중 고유진동수 비교

2.3 수중에서의 진동모드 해석

수중의 경우에 대한 진동특성 해석을 위하여 구조물과 유체의 탄성효과를 고려할 수 있도록 3차원 유체요소(FLUID80)를 추가적으로 사용하였다. 이때 유체요소에 사용한 물성치는 다음과 같다.

- 유체(물) 체적탄성계수 : $22 \times 10^8 \text{ Pa}$
- 밀도 : 1000 Kg/m^3
- 점성계수 : $1.005 \times 10^{-3} \text{ N s/m}^2$

3차원 유체요소로 유체를 모형화 할 때 사각기둥(brick shaped) 형상으로 mesh를 나누어야 하는데 ANSYS로 3차원 요소를 생성시키기에는 너무 많은 시간은 요구하기 때문에 TRUE GRID(mesh generator) software^[3]를 사용하였다. 그리고 구조물이 복잡하고 유체와 구조물을 동시에 해석하는 과정에서 구조물과 유체에 대한 요소 수가 너무 많기 때문에 피복관은 center line을 중심으로 한 4절점 elastic shell 요소를 사용하였다.

본 연구에서는 유체 간격 변화에 따른 모의 연료봉의 진동특성 변화를 고찰하기 위하여, 유체간격을 연료봉 반경의 1/2~20 배까지 10 단계로

나누어서 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Table 2에 나와있다. 공기중보다 유체 내에서의 모의 핵 연료봉의 고유진동수가 작아지며, 유체의 간격이 클수록 고유진동수가 더 작아지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 유체가 구조물에 부가적인 질량으로 작용하며 간격이 증가할수록 부가질량 효과가 더욱 증가하기 때문이다. 그리고 모의 핵연료봉의 고유진동수는 간극선재의 질량과는 거의 무관하나 인장력(약 3kgf)이 존재할 경우에는, 압축 효과로 인하여 고유진동수가 약간 감소함을 볼 수 있다.

Table 2 유체 간격에 따른 고유진동수

(a) with tension

◆ H-F = Hinged-Free, G-F = Guided-Free ◆ 단위 = Hz

Mode Shape	B.C	Fluid gap(G) / Fuel rod radius(r)							
		0.5	0.8	1	2	3	4	5	20
2nd	H-F	3.74	3.95	3.90	3.78	3.59	3.01	3.00	1.37
	G-F	4.01	4.05	4.03	3.94	3.74	3.64	3.49	1.57
3rd	H-F	9.00	9.18	9.54	9.47	8.33	8.98	8.67	3.80
	G-F	9.34	9.54	9.57	9.65	9.35	9.11	8.74	4.14
4th	H-F	16.20	16.80	16.59	16.94	11.18	15.37	15.40	6.66
	G-F	16.42	16.92	17.06	17.13	16.68	16.21	15.60	7.27
5th	H-F	25.38	26.23	25.58	26.58	22.30	24.81	23.99	10.42
	G-F	25.49	26.43	26.71	26.72	26.09	25.18	24.13	11.08

(b) without tension

Mode Shape	B.C	Fluid gap(G) / Fuel rod radius(r)							
		0.5	0.8	1	2	3	4	5	20
2nd	H-F	5.87	6.01	6.02	5.70	5.02	5.52	4.53	2.34
	G-F	6.90	7.16	7.19	7.15	6.49	6.67	5.96	2.51
3rd	H-F	9.11	10.24	11.07	10.90	10.48	10.01	8.74	4.84
	G-F	12.06	12.67	12.64	12.80	12.08	11.31	11.39	5.13
4th	H-F	17.26	17.77	17.55	17.93	17.57	17.01	16.01	7.87
	G-F	19.42	20.12	20.80	20.93	20.35	18.75	18.23	7.93
5th	H-F	24.14	27.07	27.42	27.58	27.07	25.75	24.27	11.67
	G-F	28.32	28.40	29.78	30.05	29.19	28.09	27.01	12.00

3. 검증실험

3.1 실험목적

모의 핵연료봉의 공기중과 수중에서의 고유진동수를 측정하여 동특성 해석모델의 검증 및 실제 핵연료봉의 동특성 변화를 정확히 예측하여 유체 진동 현상으로 인한 노심의 건전성 평가 자료로 활용코자 한다.

3.2 실험장치 개요

모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성 추출을 위한 실험장치가 Fig. 6 에 나와 있다. 모의 핵연료봉을 지지하는 가이드 레일은 상부에 절연하여 고정시켰다. 그리고 실험에 사용된 장비들은 아래와 같다:

Equipments	Specifications
Accelerometer	PCB Piezotronics VW 352B10
Impact hammer	B&K 8200
Signal Conditioner	Charge amp. B&K 2635 PCB 482A16
Signal analysis	IDEAS TDAS 8m3
Data acquisition	VXI 1432 (Agilent)

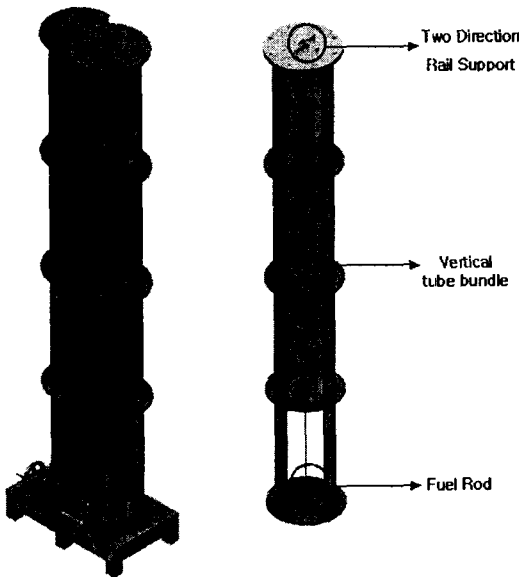


Fig. 6 실험장치

3.3 실험방법

본 실험의 주목적은 모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성 상관관계를 구하고, 해석적 모델의 검증에 위한 것이다. 따라서 본 실험은 공기중 실험과 수중 실험의 두 가지의 경우로 나누어 수행되었으며, 공기중의 경우 충격가진 방법을 사용하였으며, 수중의 경우에는 electro-mechanical 가진 방법을 사용하였다.

공기중 실험의 경우에는 모의 핵연료봉의 keyway 부분을 가이드레인에 지지시켰고, 임팩트 햄머(impact hammer)를 이용하여 충격가진 방법을 사용하였다. 모의 핵연료봉의 XZ(hinged-

free)방향과 YZ(guided-free)에 대한 모드 형상을 구하기 위한 절점들의 위치는 길이방향으로 1개의 지지점과 가속도계가 부착된 9 개로 구성되어 있다.

수중 실험의 경우에는 길이방향으로 11 개의 절점으로, 1 개의 지지점과 10 개의 가속도계 지점으로 구성되어 있다.

충격가진 및 electro-mechanical 가진을 통하여 측정된 가진 및 응답신호는 I-DEAS TDAS 8m3 소프트웨어^[4]를 사용하여 Agilent VXI 시스템의 front end input 모듈(VXI 1432)로 입력된다. 입력된 신호들은 FFT 변환 및 평균화되어 주파수응답함수로 계산되어진다.

공기중 및 수중에서 충격가진을 통한 평균 횡수는 5 회로 하였다. 그리고 공기중 및 수중 실험 모두의 경우에 대해 측정주파수 범위는 100Hz 로 하였으며 샘플링 시간간격은 1/4096 초로 하였다. 이때 주파수응답함수를 구하기 위하여 필요한 FFT의 데이터 개수는 8192 개로 하였다.

전체적인 측정장비 개략도가 Fig. 7 에 나와 있다.

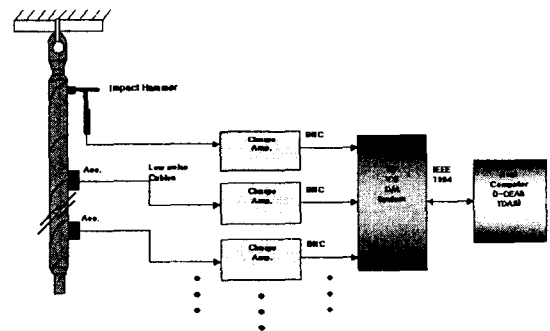


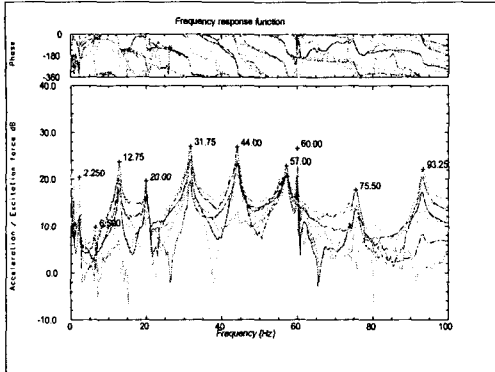
Fig. 7 측정장비 개략도

4. 결과

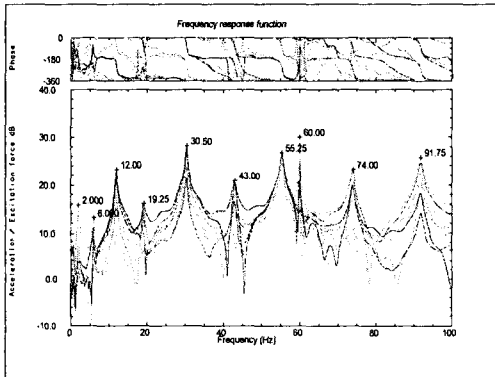
Fig. 7 과 Fig. 8 은 공기중 및 수중에서 구한 모의 핵연료봉의 주파수 응답함수를 각각 보여준다. 가진입력과 가속도 응답사이의 선형성이 매우 좋으며, 고유진동수 위치가 고 주파수 영역까지 뚜렷하게 분리되어 나타나고 있음을 보여준다.

공기중에서 측정한 모의 핵연료봉의 각 모드별 고유진동수를 Fig. 9 에서 유한요소해석 결과와 비교하였으며, 수중의 경우에 대해서는 Fig. 10 에 나와 있다. 공기중에서 유한요소 해석결과와 실험치가 약 10% 정도 오차를 보이고 있으며, 수중의 경우에는 15-20%정도 차이가 있으나 구조물의

기본 고유진동수가 저주파 영역임을 감안하면 유한요소 해석결과가 유용하다고 판단된다.



(a) hinged-free 조건



(b) guided-free 조건

Fig. 7 공기중 주파수 응답함수

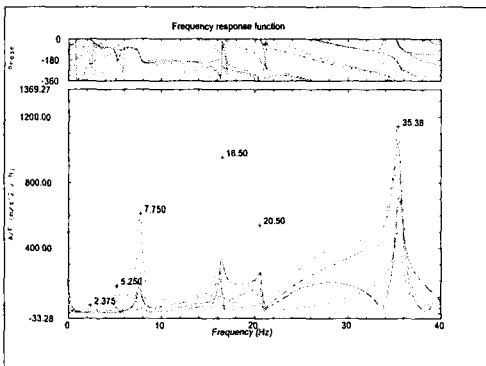


Fig. 8 수중 주파수 응답함수

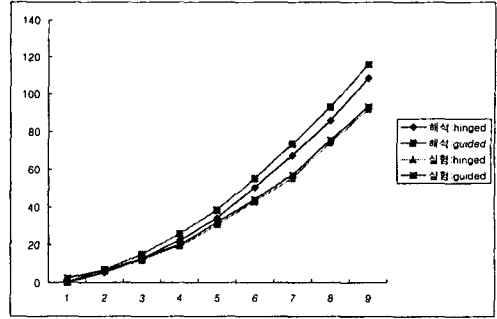


Fig. 9 공기중 고유진동수 비교

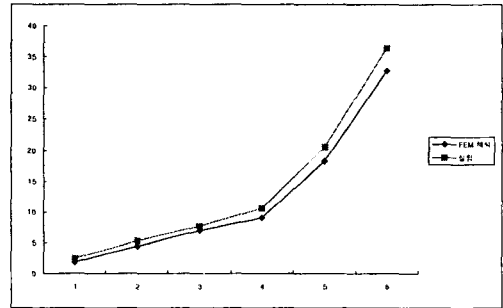


Fig. 10 수중 고유진동수 비교

5. 결론

- (1) 공기중의 경우 핵 연료봉의 기본 고유진동 주파수는 6 Hz 이며, 수중의 경우에는 2.4 Hz 로서 부가질량효과로 인하여 고유진동수가 현저히 감소 하였다.
 - 진동모우드에 따라 최대 54%에서 최소 9%로 감소함
- (2) 유체의 간격이 증가함에 따라 모의 핵 연료봉의 고유 진동수가 감소 하였다.
 - 유체의 부가질량 효과가 간격이 증가함에 따라 더욱 증가함을 정량적으로 확인함.
 - 부가 질량 효과는 진동모우드별로 달라짐
 - 형상비(유체간격/구조물의 반경)에 따라 최대 20%와 최소 0.5%의 감소 비율을 확인함
- (3) 간극선재의 질량은 연료봉의 고유진동수에 거의 영향을 미치지 않는다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 기
금으로 수행되었음

참 고 문 헌

- (1) ANSYS User's Manual for Revision 5.0 Volume III,
IV Swanson Analysis Systems, Inc., 1992.
- (2) J. W. Leonard, H. U. Ahmed, J. A
Swanson, "Application of ANSYS Fluid Elements in
Fluid-Structural Interaction Problems", Paper B 4/6,
5th SMIRT, 1979
- (3) TrueGrid User's Manual for Revision 2.0 Volume I,
II XYZ Scientific Applications, Inc. 1999
- (4) Structural Dynamics Research Corporation,
Introduction to I-DEAS, 2001