

지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성

최명환[†], 강흥석*, 윤경호*, 김형규**, 송기남**

(2002년 7월 25일 접수, 2002년 12월 23일 심사완료)

Vibration Characteristics of a Dummy Fuel Rod Supported by Spacer Grids

Myoung-Hwan Choi, Heung-Seok Kang, Kyung-Ho Yoon
Hyung-Kyu Kim and Kee-Nam Song

Key Words : Spacer Grid(지지격자), Fuel Rod(연료봉), Natural Frequency(고유진동수), Mode Shape(모드형상), Modal Assurance Criteria(MAC:모달확신기준)

Abstract

The spacer grid is one of the main structural components in the fuel assembly, which supports the fuel rods and maintains coolable geometry from an external load. A vibration test and a finite element analysis using ABAQUS on a dummy fuel rod continuously supported by Optimized H type(OHT) and New Doublet (ND) spacer grids are performed to obtain the vibration characteristics such as natural frequencies and mode shapes and to verify a finite element model. The results from the test and the finite element analysis are compared by modal assurance criteria (MAC) values. It is resulted that MACs for the first, the third and the fifth mode shapes are relatively good as compared with those of the second and fourth ones. The natural frequency differences between two methods as well as the mode comparison results for the rod with OHT spacer grid are better than those with ND spacer grid. It is judged that the FE model for the ND spacer grid spring should be modified to consider the long contact length which actually happen when the spring supports the rod.

1. 서 론

경수로(pressurized water reactor: PWR)용 핵연료 집합체(fuel assembly)의 지지격자(spacer grid)는 원자로 내에서 연료봉을 지지하고, 지진과 같은 외부 하중으로부터 연료봉을 보호하며 원자로의 긴급냉각이 가능하도록 충분한 구조강도를 갖추어야 하는 중요한 구조물이다. 이러한 지지격자의 성능을 검증하기 위한 기본시험으로서 격자체에 대한 충격 및 좌굴시험, 연료봉 지지부위에 대한 프레팅 마멸시험 그리고 연료봉 지지성능시험 등과 같은 기계, 구조적 시험이 수행되고 있다.⁽¹⁻⁵⁾

원자로 내에는 0~50 Hz 사이의 광대역 진동원

이 존재하는 것으로 알려져 있으며,⁽⁶⁾ 연료봉은 가압된 냉각수의 축방향 유체유동으로 인하여 유체유발진동(flow induced vibration: FIV)이라 불리는 진동을 받는다. 이러한 유체 속에서의 연료봉의 강제진동 현상을 모사하기 위한 모델은 연료봉 주위를 흐르는 냉각재 유동에 의해 표면에 형성되는 난류경계층 내의 압력섭동(pressure fluctuation)을 연료봉의 가진력으로 보고 이를 통계적인 방법으로 접근하는 방식으로 개발되었다.⁽⁷⁾ 이 방법은 핵연료 부품의 개발단계에서 기존의 유동데이터를 이용하여 연료봉의 진동특성을 예측하는 데 유용하게 이용될 수 있는데, 우선 연료봉에 대한 고유치 문제를 풀고 이를 유동데이터와 결합하는 것이다.^(8,9)

한편, 연료봉은 대체적으로 8개에서 11개의 지지격자 스프링으로 연속 지지된 보의 형태로 원자로 내에 놓여지게 되며, 연료봉과 지지격자 지지부 사이에서의 상대운동으로 인하여 연료봉의 프레팅 마멸 손상을 일으키게 되어 연료봉의 수

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소
E-mail : cmh2002@orgio.net
TEL : (042)868-2298 FAX : (042)863-0565

* 한국원자력연구소

** 회원, 한국원자력연구소

명을 단축시킬 수 있다. 따라서 핵연료의 한계수명(3~5년)까지 기계적인 원인에 의해 연료봉이 손상되지 않도록 하기 위해서는 지지격자 개발단계에서부터 연료봉과 지지격자 간의 진동거동에 대한 고려가 필요하다. 연료봉의 진동거동에 대한 이전의 연구결과에 의하면, 핵연료봉을 지지하는 지지격자 스프링의 설계에 따라 진동특성이 상당히 변할 수 있고,⁽¹⁰⁾ 실제로 여러 형태의 지지격자에 따라서 진동특성이 달라짐이 보고 되었다.⁽¹¹⁾ 이에 따라 개발된 지지격자가 원자로 운전 환경하에서 연료봉과 지지격자 사이의 분리현상 없이 안전하게 설계되었는지를 검증하는 절차가 필요하다. 검증절차는 원자로 실제 운전을 통하여 수행하는 방법도 있으나, 핵 발전설비의 특성상 매우 난이하고 위험한 작업이므로, 실제 모델을 근사화한 이론적 모델을 통하여 수행하는 것이 일반적이다. 이를 위해서는 신뢰도 있는 이론 모델의 개발 및 검증이 필수적이기 때문에 개발된 지지격자에 대한 시험을 통하여 진동특성을 파악하고, 이를 모사하기 위한 이론적 모델의 검증절차에 대한 연구가 수행되었다.^(12,13)

본 연구에서는 여러 형태의 지지격자 중에서 기계적, 구조적 성능이 우수한 것으로 평가된 최적화된 H 형(Optimized H Type: OHT) 지지격자와 새 이중판(New Doublet: ND) 지지격자에 대한 핵연료봉의 지지성능을 비교하기 위하여 수행한 진동특성에 대하여 기술하였다. 또한 시험결과의 타당성을 검증하고자 유한요소해석 모델로 수행한 결과와 시험결과를 비교, 분석하였다. 수치적 방법에 의한 진동해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁴⁾를 사용하였으며, 유한요소해석과 진동시험 결과를 비교/분석하기 위하여 IDEAS⁽¹⁵⁾의 시험 모듈인 TDAS 를 사용하였다. 본 연구를 통하여 개발된 해석적 계산모델은 지지격자의 모델개선, 새로운 지지격자의 개발 및 설계 단계에서 실제 진동시험을 대신하여 동적특성을 예측하기 위하여 사용될 수 있다.

2. 진동시험

2.1 지지격자 및 연료봉

본 논문에서는 기존의 H 형 지지격자⁽²⁾와 이중판 노즐형 지지격자⁽³⁾를 기초하여 개발된 최적화 H 형 지지격자와 새 이중판 지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성에 대하여 기술하였다.

Fig. 1은 연속 지지된 모의 형태로 원자로 내에

놓여지게 되는 연료봉 모델의 H 형 지지격자 지지부 형상을 나타내었다. 연료봉은 단일 평면에서 하나의 스프링(Spring)과 그 반대쪽에 있는 두 개의 딥플(Dimple)이라고 부르는 구조로 지지된다. 이러한 스프링과 딥플의 지지구조는 다시 90° 돌아간 평면상에 한 세트(set)가 더 존재하기 때문에, 지지격자는 단일셀 당 2개의 스프링과 4개의 딥플로, 새 이중판의 경우 단일셀 당 4개의 면접촉 스프링으로 연료봉을 지지하게 된다

Fig. 2와 3은 각각 5×5형 최적화 H 형과 새 이중판 지지격자체의 형상을 나타내었다. OHT 지지격자는 연료봉을 감싸는 형상인 스프링 및 딥플을 특징으로 하고 있으며, 기존의 H 형 스프링 부착 지지격자의 장점에 스프링 지지부의 탄성변형 한계를 확대시킨 것이다. 또한 새 이중판지지격자는 이중판 노즐형 지지격자에 기초하여 개발된 것으로 연료봉을 지지하는 스프링 강성을 완화시킨 것이다. 스프링 강성의 완화책으로서 스프링 양편에 가늘고 긴 슬롯(slot)을 두어, 스프링 강성을 설계자 의도대로 완화시키고 접촉면에서의 마멸특성도 크게 향상시켰다.⁽¹⁰⁾

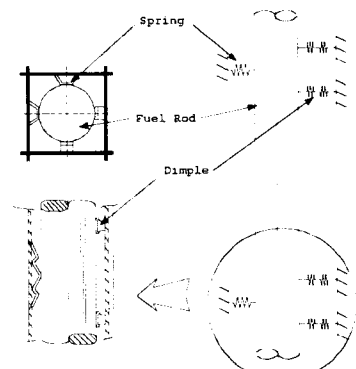


Fig. 1 Fuel rod supported by spacer grid

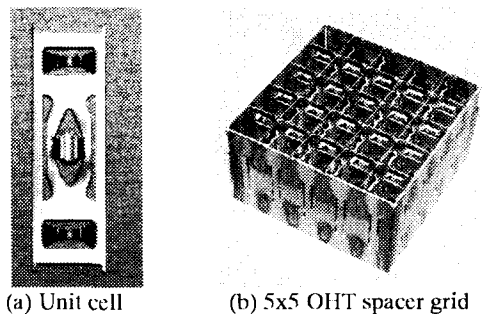


Fig. 2 Shape of optimized H type spacer grid

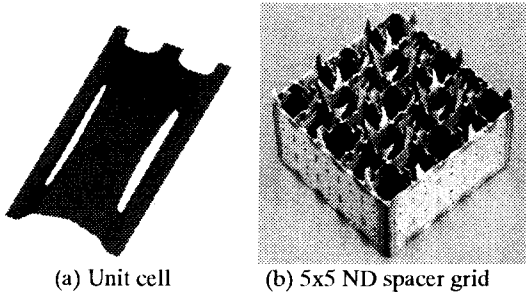


Fig. 3 Shape of new doublet spacer grid

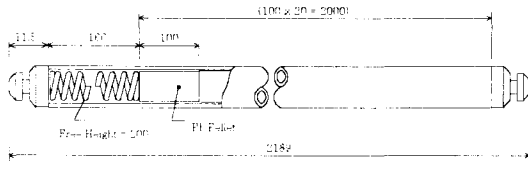


Fig. 4 Dimensions of the dummy fuel rod (Unit: mm)

진동시험에 사용된 모의 연료봉의 기하학적 형상 및 치수는 Fig. 4와 같으며, 납봉으로 채워진 2 m 구간을 stack 영역, 좌측 스프링이 있는 공간을 plenum 영역이라 한다. Stack 영역에서 10.4 g/cm³의 밀도를 갖는 UO₂ 소결체는 11.4 g/cm³의 밀도를 갖는 납봉으로 대체하여 제작하였다. 시험봉의 피복관과 상,하단 봉단마개 그리고 plenum 스프링 등 소결체를 제외한 모든 부품은 실제 연료봉의 부품을 사용하였다.

2.2 시험개요

핵연료봉 지지격자 및 진동특성 해석을 위한 시험장치는 공기 및 고온/수중시험이 가능하도록 구성되었으며,⁽¹⁶⁾ 시험에 사용된 주요 장비 및 센서로는 data acquisition & control system, 가진기, 가속도계, 레이저 변위계, I-DEAS TDAS 등이 있다. 연료봉의 길이는 2.19 m 이고, 이들은 Fig. 5에서와 같이 처음 세 구간은 0.564 m, 마지막 구간은 0.4 m 의 간격으로 다섯개의 지지격자가 연료봉을 지지하도록 구성되었다. 가속도계는 지지격자 사이의 한 구간에 2개를 각각 1/4과 3/4 지점에 부착하였고, 최대변위가 예상되는 두번째 구간의 중앙에 1개를 추가로 부착하였으며, 레이저 변위센서를 이용하여 변위를 측정하였다. 시험은 공기중과 수중에서 가진력이 조절되는 가진기로 연료봉을 5~150 Hz 범위에서 sine sweep 하며, 9개의 가속도계에서 측정된 신호를 I-DEAS 의 TDAS 를 이용하여 고유진동수, 모드형상, 해석결과와의 상호관계 등을 분석하였다.

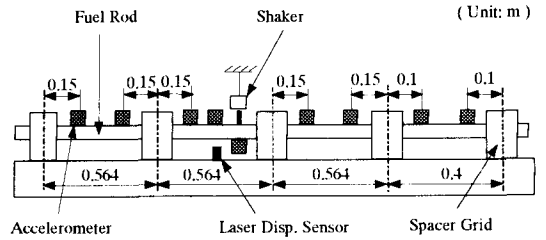


Fig. 5 Installation position of sensors

3. 유한요소해석

3.1 해석모델 및 방법

시험결과와의 비교, 검증 및 해석모델 개발을 위하여 유한요소해석 프로그램, ABAQUS 를 이용한 자유진동해석을 수행하였다. 모의 연료봉은 ABAQUS 에서 제공하는 2 절점 선형 요소(B21)를 이용하여 모델링하였고, 지지격자 스프링과 덤플은 2D 스프링 요소(SPRINGA)를 사용하였다. 모델은 전체 253 개의 절점과 252 개의 요소로 생성되었고, 모달해석을 위하여 Lanczos 방법을 이용하였다. 스프링 요소로 모델링된 지지격자 스프링과 덤플의 강성은 실험을 통하여 얻은 값을 사용하였는데, 최적화 H 형 지지격자의 스프링과 덤플의 강성은 각각 128 N/mm 와 506 N/mm 이고, 새 이중관 격자의 스프링 강성은 114 N/mm 이다.⁽¹¹⁾ 유한요소해석에서 지지격자 스프링과 연료봉 사이에서 실제 발생하는 마찰에 의한 영향과 접촉부위에서 발생하는 감쇠 등은 무시하였다. 그리고 수중 모델에 대해서는 상온에서의 물에 의한 부가질량에 상응하는 질량만큼 재료의 밀도가 증가한 것으로 고려하였는데, plenum 영역에 대해서는 10600 kg/m³ 과 소결체가 있는 stack 영역에 대해서는 11193 kg/m³ 을 사용하여 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

진동시험 및 유한요소해석을 통한 결과들은 최적화 H 형 지지격자와 새 이중관 지지격자로 지지된 연료봉에 대하여 상온 공기와 수중에서의 가진력에 따른 변위, 고유진동수 및 모드형상으로 제시하였다. 또한 시험과 유한요소 해석을 통한 모드의 상호관계를 나타내는 모달확신기준(modal assurance criteria: MAC) 값을 통하여 시험결과와 신뢰성을 평가하였다.

Table 1 Displacements of the fuel rod supported by OHT and ND spacer grids by test in air

Force	Optimized H type		New Doublet	
	Disp. (mm)	Fund. freq. (Hz)	Disp. (mm)	Fund. freq. (Hz)
0.25N	0.10	34.64	-	-
0.5 N	0.22	32.44	0.10	48.57
0.75N	0.29	31.47	0.13	47.04
1.0 N	-	-	0.19	47.03
1.25N	-	-	0.20	45.75

Table 2 Displacements of the fuel rod supported by OHT and ND spacer grids by test under water

Force	Optimized H type		New Doublet	
	Disp. (mm)	Fund. freq. (Hz)	Disp. (mm)	Fund. freq. (Hz)
0.25N	0.10	32.21	-	-
0.5 N	0.21	31.02	0.12	45.32
0.75N	0.28	30.05	0.21	44.35
1.0 N	-	-	0.23	44.04
1.25N	-	-	0.25	43.74

4.1 변위

일반적으로 연료봉은 원자로 내 정상운전 상태에서 0.2 mm 보다 작은 진동 진폭을 갖는 것으로 알려져 있으며,⁽¹²⁾ 본 시험에서는 어느 정도의 하중에서 운전상태와 유사한 변위를 보이는가를 결정하기 위하여 최대변위가 예상되는 연료봉의 중간 부위에 레이저 변위센서를 설치하여 가진 하중에 따른 변위를 얻었다. Table 1과 2는 최적화 H 형과 새 이중관 지지격자로 지지된 연료봉에 대하여, 각각 공기중과 수중에서의 측정 변위를 나타내었다. 또한 Fig. 6은 최적화 H 형 지지격자로 지지된 연료봉의 공기중 시험결과를 주파수 영역의 변위로 나타낸 예이다. 동일한 가진하중에 대하여 새 이중관 보다는 최적화 H 형 격자로 지지된 연료봉의 변위가 더 크고, 고유진동수는 낮은 값을 보였다. 가진하중이 커짐에 따라 변위는 증가하고, 고유진동수는 낮아지는데, 이런 결과는 Premount⁽¹⁷⁾에 의해서 처음 보고 되었다. 이러한 현상은 비선형 특성을 지닌 구조물의 전형적인 현상으로 연료봉을 지지하고 있는 지지 구조물인 스프링이 연화되는(softening) 특성을 지님을 간접적으로 나타내는 것이다. 또한 수중에서 최적화 H 형 격자로 지지된 경우, 하중에 따른 변위는 공기중과 같거나 약간 낮은 결과를 보인 반면, 새 이중관 지지격자로 지지된 연료봉은 수중에서의 변위가 공기중보다 더 크게 나타났다. 그 이유는 동일한 하중 조건에서 다른 환경으로 인해 구조물의 고유진동수가 낮아진다면, 이는 강성의 저하를 의미하며 이로 인하여 변위는 증가되는 것이다. 이러한 경향은 다른 지지격자에 대한 기존의 연구결과에서도 보인 바 있다.^(12,16) 이상의 변위결과로부터 지지격자로 지지된 연료봉의 수중 변위가 운전상태와 유사한 가진력의 크기는 최적화 H 형 지지격자의 경우 0.5 N, 새 이중관 지지격자의 경우 0.75 N으로 시험하는 경우이며, 이때 측정된 변위는 두 경우 모두 0.21 mm 를 보였다.

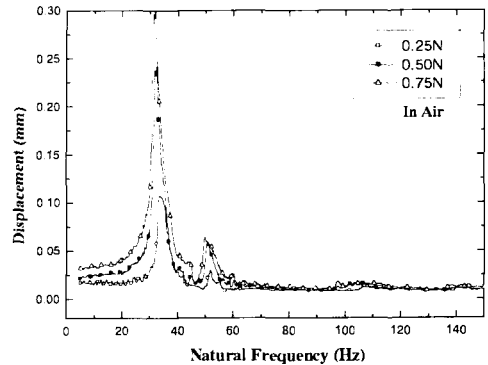


Fig. 6 Displacements measured from the dummy fuel rod supported by OHT spacer grids

4.2 고유진동수 및 모드형상

측정된 입력신호와 응답신호는 TDAS 프로그램을 이용하여 모달해석 (Modal Analysis) 및 상호관계(Correlation) 분석을 수행하였고, 결과들은 가진하중에 따른 고유진동수, 모드형상 그리고 MAC 값 등으로 기술하였다.

Table 3은 최적화 H 형 지지격자로 지지된 연료봉의 공기중 가진하중에 따른 시험과 유한요소해석 결과의 비교를 나타내었다. 여기서 유한요소해석 결과는 자유진동해석 결과이므로 시험에서와 같이 가진하중에 따른 변화를 나타내지는 못하였다. 시험결과는 유한요소해석 결과에 비해 전체적으로 낮은 값을 보였는데, 0.5 N의 하중에서 시험에 의한 기본진동수는 32.44 Hz 로 해석에 의한 40.06 Hz보다 약 23.5% 낮은 값을 보였다. 이러한 차이에는 실험과 해석상의 많은 원인이 있을 수 있는데, 그 중에서도 실험중에 연료봉과 스프링/덤플의 접촉, 분리 현상이 발생할 수 있어 이것이 연료봉의 진동수를 낮추는 것으로 판단되며, 또한 이러한 현상을 해석에서는 모사하지 못하기 때문에 상대적으로 상계된 값을 갖기 때문으로 생각된다.

Table 3 Natural frequencies and MAC values of the dummy fuel rod supported by OHT spacer grids with force levels in air

Force (N)	Mode	Natural Freq.(Hz)		Error* (%)	MAC (%)
		Test	FEA		
0.25	1	34.64	40.06	15.64	0.948
	2	46.62	46.62	0.00	0.958
	3	51.03	55.64	9.05	0.908
	4	101.1	85.55	-15.41	0.792
	5	109.7	126.9	15.75	0.890
0.5	1	32.44	40.06	23.48	0.951
	2	46.31	46.62	0.67	0.879
	3	49.44	55.64	12.55	0.923
	4	98.63	85.55	-13.26	0.279
	5	108.4	126.9	17.15	0.837
0.75	1	31.47	40.06	27.3	0.935
	2	44.88	46.62	3.88	0.945
	3	49.07	55.64	13.39	0.932
	4	101.4	85.55	-15.62	0.505
	5	105.9	126.9	19.8	0.888

$$*: Error = \frac{FEA - Test}{Test} \times 100(\%)$$

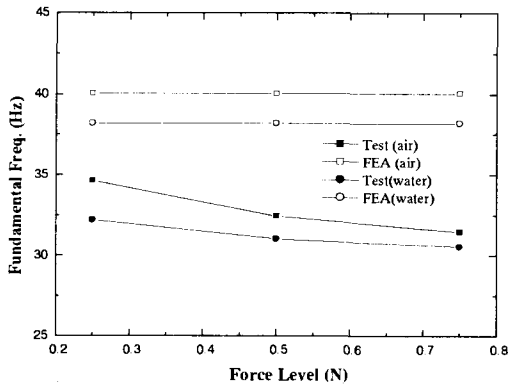


Fig. 7 Fundamental frequencies of the dummy fuel rod supported by OHT spacer grids with force levels

Fig. 7은 최적화 H형 지지격자로 지지된 연료봉의 가진하중에 따른 공기중과 수중, 시험결과 유한요소해석에 의한 기본진동수의 변화를 나타내었다. 가진하중이 커짐에 따라 고유진동수는 감소하는 경향을 보였고, 추가질량의 영향으로 수중에서의 고유진동수는 공기중에 비하여 0.25 N 하에서는 7%, 0.5 N 은 4.3%, 0.75 N의 하중작용 시에는 3% 감소하였다. 또한 가진하중의 증가에 따른 고유진동수의 감소는 수중에서 보다 공기중에서 더 크게 나타났다.

Table 4 Natural frequencies and MAC values of the dummy fuel rod supported by ND spacer grids with force levels in air

Force (N)	Mode	Natural Freq.(Hz)		Error* (%)	MAC (%)
		Test	FEA		
0.5	1	48.57	32.23	-33.65	0.980
	2	49.90	39.86	-20.12	0.365
	3	53.53	50.32	-6.01	0.924
	4	128.45	114.89	-10.55	0.801
	5	128.45	114.89	-10.55	0.801
0.75	1	47.04	32.23	-31.49	0.950
	2	49.25	39.86	-19.10	0.130
	3	51.06	50.32	-1.45	0.940
	4	128.18	114.89	-10.36	0.814
	5	128.18	114.89	-10.36	0.814
1.0	1	47.03	32.23	-31.48	0.793
	2	49.24	39.86	-19.00	0.120
	3	50.41	50.32	-0.19	0.950
	4	128.09	114.89	-10.30	0.813
	5	128.09	114.89	-10.30	0.813
1.25	1	45.75	32.23	-29.56	0.965
	2	47.97	39.86	-17.73	0.254
	3	50.77	50.32	-0.90	0.957
	4	127.9	114.89	-10.18	0.866
	5	127.9	114.89	-10.18	0.866

$$*: Error = \frac{FEA - Test}{Test} \times 100(\%)$$

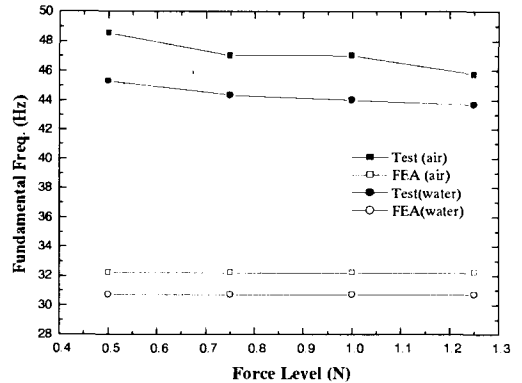


Fig. 8 Fundamental frequencies of the dummy fuel rod supported by ND spacer grids with force levels

Table 4 는 새 이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 공기중 가진하중에 따른 유한요소해석과 시험결과의 비교를 나타내었고, Fig. 8 은 공기중과 수중에서의 기본진동수의 변화를 나타낸다. 가진하중에 따라 기본진동수는 45.75~48.57 Hz 범위에서 변하였고, 최적화 H형 격자로 지지된 연료봉의 진동수보다 약 14 Hz 더 높은 값을 보였다. 가진하중이 커지면서 고유진동수는 낮아지고, 0.75 N 하중에서 공기중 기본진동수는 47.04 Hz이며, 수중에서는 44.35 Hz로 약 5.7%의 진동수 감소가 있었다. 또한 새 이중판 지지격자로 지지된 연료봉은 시험결과가 해석결과보다 약 30% 정도 더 높은 진동수를 나타내었다.

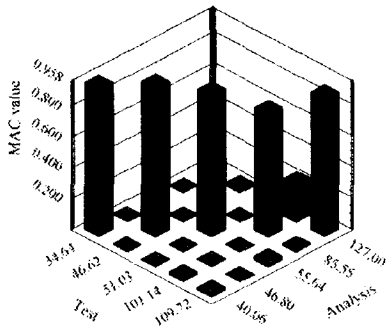


Fig. 9 MACs of the dummy fuel rod supported by OHT spacer grids under 0.25 N

이것은 새 이중관 격자의 경우 스프링과 연료봉이 변접촉을 하는데 이를 단순한 스프링으로 모델한 해석상의 문제로 생각된다. 이를 해결하기 위해서는 경제적, 시간적인 면에서의 손실은 있겠지만, 연료봉과 지지격자 사이의 접촉현상을 모사하여 진동해석이 가능하도록 유한요소모델 및 해석방법을 개선하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

일반적으로 시험과 유한요소해석에 의한 두 모드의 상호관계를 평가하는 기준으로 모달확신기준(MAC) 값을 사용한다. MAC은 비교하고자 하는 두 벡터의 방향 여현을 의미하므로 동일한 벡터의 비교에서는 일 (1 혹은 100%)을, 전혀 유사성이 없는 벡터의 비교에서는 영(0 혹은 0%)을 나타낸다. 보통 80%이상의 값을 보일 때 두 모드는 같다고 볼 수 있으며, 10% 이하의 값에 대해서는 전혀 다른 모드로 평가할 수 있다⁽⁸⁾.

최적화 H 형 지지격자로 지지된 연료봉의 공기중에서의 MAC 그래프와 모드형상을 각각 Fig. 9과 10에 나타내었다. MAC 그래프는 처음 3차까지의 모드들은 90%이상, 고차에서도 80%이상의 값을 보여 시험에 의한 결과와 유한요소해석 모델이 신뢰할 만 함을 보였다. 원으로 표시한 시험 모드형상은 각 모드에 대하여 9점의 측정값 중 제일 큰 값으로 정규화(normalized)하여 도시한 것이다. 큰 MAC 값을 보이는 모드에서는 시험과 해석 모드형상들이 잘 일치하였다. 그러나 모드형상에서 알 수 있듯이 4차 모드는 해석에서 연료봉의 네번째 구간의 굽힘모드가 크게 나타나는 모드이다. 하지만, 시험에서는 두번째 구간에 가진기가 설치되어 힘을 가하고 있는 상태이기 때문에 두번째와 세번째 구간의 상대적인 변위가 커지도록 모드를 왜곡시키고 있다. 이로 인하여 두 방법에 의한 모드간의 신뢰성이 떨어지고 있으며, 가진하중이 커질 때 이러한 현상은 더 크게 나타났다.

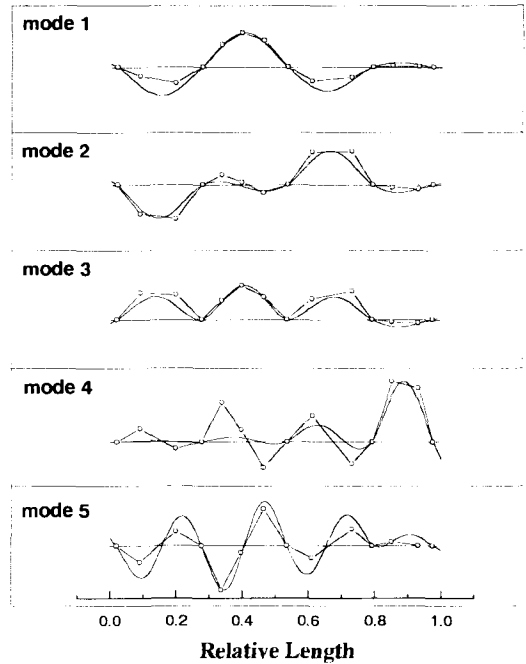


Fig. 10 Mode shape comparison of the dummy fuel rod supported by OHT spacer grids (0.25 N, in air)

새 이중관 지지격자로 지지된 연료봉의 MAC 그래프를 Fig. 11에 나타내었다. 이 경우 시험에서 4차 모드를 추출하지 못하였고, 2차 모드에서의 MAC 값이 상당히 작았다. 그 원인은 Fig. 12의 모드형상을 통하여 확인할 수 있는데, 유한요소해석 결과는 두번째 구간에서 비교적 작은 상대변위를 갖는 2차 굽힘모드이고, 세번째 구간에서 제일 큰 상대변위를 보였다. 그러나 시험에서는 두번째 구간에서 상대 진폭이 제일 큰 1차 굽힘모드를 보였다. 따라서 시험을 통한 2차 모드는 해석에서와 같이 지지점 근처에서의 미소한 모드변화를 보이지 못하였으며, 이는 변접촉하는 지지격자의 특성과 가진기에 의한 모드의 왜곡에 의한 것으로 판단된다. 또한 2차모드에서는 다른 모드들에서와는 달리 모든 구간에서의 해석과 시험에 의한 상대적인 진폭들이 많이 다르기 때문에 좋지 않은 MAC 값을 보인 것이다. 본 논문에서 나타내지는 않았으나 수중에서의 모드형상은 공기중에서의 모드들과 동일한 결과를 보여, 물로 인한 부가질량은 구조물의 고유진동수를 감소시키나 모드에는 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

이상의 결과들로부터 원자로 내의 냉각재 유동에 의한 압력섭동이 연료봉의 가진력으로 작용할 때, 지지격자의 성능에 따라서 연료봉에 작용하는 진동을 억제하는 정도가 다를 것이라는 것을 고

려한다면, 이들 진동특성은 중요한 의미를 갖는다. 지금까지 알려진 원자로 내에 존재하는 50 Hz 정도까지의 진동원과 유동테이터에 근거한다면 연료봉의 진동은 일차모드가 지배적일 것이므로, 이를 높이는 방향으로 설계가 이루어져야 할 것으로 판단되며, 진동수 측면에서 새 이중관 지지격자의 지지성능이 최적화 H 형 보다 상대적으로 우수한 것으로 평가되었다.

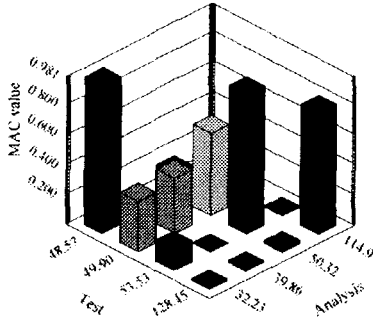


Fig. 11 MACs of the dummy fuel rod supported by ND spacer grids under 0.5 N

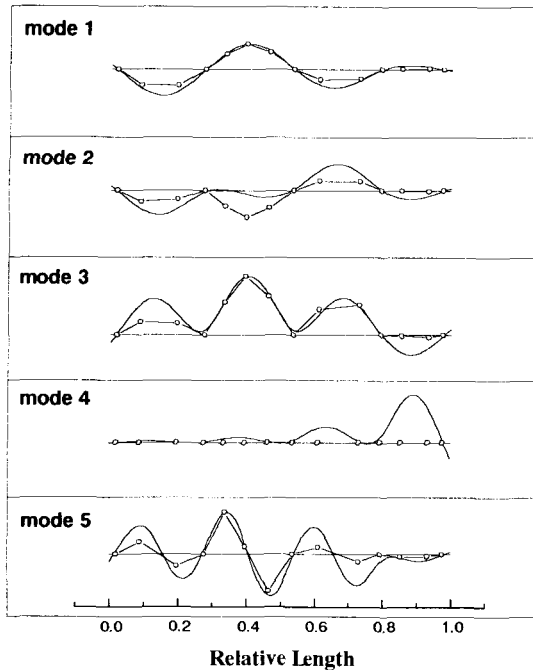


Fig. 12 Mode shape comparison of the dummy fuel rod supported by ND spacer grids (0.5 N, in air)

5. 결론

(1) 모의 연료봉의 공기중 기본진동수는 최적화 H 형과 새 이중관 지지격자로 지지되는 경우 각각 31.47~34.64 Hz와 45.75~48.57 Hz의 범위에 있어, 새 이중관 지지격자로 지지된 연료봉이 약 14 Hz 정도 높은 진동수를 보였으며, 연료봉은 상온수중에서 유체의 추가질량으로 인하여 약 5% 정도의 진동수가 감소하였다.

(2) 연료봉의 진동거동은 가진력의 세기가 커질수록 고유진동수가 감소하고, 변위가 증가하는 전형적인 비선형 특성을 보였고, 이것은 연료봉을 지지하는 지지격자에 기인한 것이다.

(3) 시험에 의해 얻어진 모드형상은 2차 및 4차 모드에서 유한요소해석 결과와 상대적으로 큰 차이를 보였다. 특히 새 이중관 지지격자로 지지된 연료봉의 2차 모드의 두번째 구간에서 큰 차이를 보였고, 4차 모드는 시험에서 추출되지 않았다. 이러한 현상은 가진기의 가진력이 진동모드를 왜곡시키기 때문이다.

(4) 시험결과와 ABAQUS 를 이용한 유한요소해석 결과는 모드형상 및 MAC 값으로부터 비교적 잘 일치하여, 해석모델의 타당성을 확인하였다. 또한 해석결과는 시험결과와 비교할 때, 최적화 H 형 지지격자로 지지된 연료봉에 대한 결과가 새 이중관 스프링 지지된 경우보다 더 좋은 결과를 보였다.

(5) 새 이중관의 경우, 시험과 해석에 의한 기본진동수는 30% 정도의 오차를 보였는데, 좀더 정확한 결과를 얻기 위해서는 지지격자와 연료봉이 접촉하는 현상을 고려한 진동해석이 가능하도록 유한요소모델 및 해석방법을 개선하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능지지격자구조기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Kang, H.S., Song, K.N., Kim, H.K., Yoon, K.H. and Lee, K.H., 2001, "Evaluation of Spacer Grid Support Performance by Vibration Test," KAERI, KAERI/TR-1738/2001.
- (2) Kim, H.K., Kang, H.S., Yoon, K.H. and Song, K.N., 2001, "Experimental Investigation on the

- Parameters Affecting Fuel Fretting Wear," 16th International Conference on Structure Mechanical In Reactor Technology (SMiRT-16), Paper #1548.
- (3) Song, K.N., Yoon, K.H., Kang, B.S., Park, K.J. and Park, G.J., 2002, "Impact Analysis of Dipper-Type and Multispring-Type Rod Support Grid Assembly in PWR," *Proc. of 10th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE10-22177.
- (4) Yoon, K.H., Kang, H.S., Kim, H.K., Song, K.N. and Jung, Y.H., 2001, "Nonlinear Dynamic Buckling Behavior of Partial Spacer Grid Assembly," *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol. 33, No. 1, pp. 93~101.
- (5) Song, K.N., Yoon, K.H., Kang, H.S. and Kim, H.K., 2002, "Evaluation of Mechanical/Structural Characteristics on the Advanced PWR Spacer Grids," *Proc. of the KSME 2002 Spring Annual Meeting*, pp. 19-24, KSME 02S004.
- (6) Stoller Report, 1995, "A Study of Grid-to Rod Fretting Wear in PWR Fuel Assemblies," *SMSC*, Vol.1.
- (7) Paidoussis, M.P., 1981, "Fluidelastic Vibration of Cylinder Arrays in Axial and Cross Flow," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 76, pp. 329~360.
- (8) Kang, H.S., Song, K.N., Kim, H.K. and Yoon, K.H., 2001, "FIV Analysis for a Rod Supported by Springs at Both Ends," *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol. 33, No. 6, pp. 619~623.
- (9) Chen, S.S. and Wambsganss, W., 1972, "Parallel Flow-Induced Vibration of Fuel Rod," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 18, pp. 253~278.
- (10) Kang, H.S., Song, K.N., Yoon, K.H., Jung, Y.H. and Yim, J.S., 1998, "A Study on the Vibrational Behavior of the Fuel Rods Continuously Supported by a Rotary and Bent Spring System," *Proc. of the KSNVE 1998 Spring Annual Conference*, pp. 454~460.
- (11) Kang, H.S., Yoon, K.H., Kim, H.K., Song, K.N. and Jung, Y.H., 2002, "Vibration Characteristics of a Fuel Rod Supported by Spacer Grids -Vibration Test for a Dummy Rod with Developing Spacer Grid-," 4th ASINCO 9th KINS Workshop on the Integrity of Nuclear Safety, B07/3.
- (12) Kang, H.S., Song, K.N., Kim, H.K., Yoon, K.H. and Jung, Y.H., 2001, "Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure," *Journal of Korean Nuclear Society*, Vol. 33, No. 1, pp. 73~82.
- (13) Kang, H.S., Song, K.N., Kim, H.K. and Yoon, K.H., 2001, "Modal Analysis of a PWR Fuel Rod Supported by the Newly Designed Spacer Grids," 16th International Conference on Structure Mechanical In Reactor Technology (SMiRT-16), Paper #1425.
- (14) Hibbit, H.D., Karlsson, G.I. and Sorensen, E.P., 1999, *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 5.8, HKS Inc., RI, USA.
- (15) SDRC, 2000, *I-DEAS Master SeriesTM*, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
- (16) Lee, S.S., et al., 2000, "Dynamic Model Verification and Behavior Analysis of Newly Developed Nuclear Fuel Rod Supporting Structure," KARI, *KAERI/CM-328/99*.
- (17) Premount, A., 1982, "On the Vibrational Behavior of Pressurized Water Reactor Fuel Rods," *Nuclear Technology*, Vol. 58, pp. 483~491.
- (18) Ewins, D.J., 1984, *Modal Testing: Theory and Practice*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- (19) Choi, M.H., Kang, H.S., Song, K.N. and Jung, Y.H., 2002, "Vibration Analysis of a Dummy Fuel Rod Supported by Spacer Grids," *Proc. of the KSME 2002 Spring Annual Meeting*, pp. 7~12, KSME 02S002.