2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

최적화 H형 지지격자로 지지된 경수로용 모의 연료봉의 진동특성

Vibration Characteristics of a PWR Fuel Rod Supported by Optimized H Type Spacer Grids

최명환, 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료집합체에서 지지격자는 지진이나 냉각수 등의 외부하중으로 부터 핵연료봉을 지지하고 보호하는 중요한 구조적 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 8개의 최적화 H형 지지격자로 연속 지지된 길이 3.847 m의 경수로용 모의 연료봉에 대한 모달시험 및 ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 시험결과들은 가진하중 증가에 따라 고유진동수는 감소하는 반면, 변위는 증가하는 이전의 연구결과들과 잘 일치하였다. 또한 0.2 mm정도의 최대변위를 보이는 가진하중은 0.2~0.3 N 범위이며, 같은 하중범위에서 기본진동수는 약 42.0 Hz이고, 7번째 구간에서 상대적으로 큰 변위를 보였다. 두 해석을 통한 결과들은 MAC값과 모드형상을 통하여 비교하였으며, 2차, 4차, 7차 모드에서의 MAC값은 50%이하였다. 이들 모드에서 MAC값이 상대적으로 낮은 이유는 가진기의 가진력이 다른 모드들 보다 이들 모드의 진동진폭에 더 큰 영향을 주기 때문으로 판단된다.

Abstract

The spacer grids are one of the main structural components in the fuel assembly, which supports and protects the fuel rods from the external loads by seismic and coolant flow. In this study, a modal test and a FE vibration analysis using ABAQUS are performed on a PWR dummy fuel rod of 3.847 m which is continuously supported by eight Optimized H type spacer grids. The experimental results agree with previous works that the natural frequencies decrease, while the amplitudes increase, with the increase of the excitation force. The force levels showing the maximum displacement of 0.2 mm are in the range from 0.2 N to 0.3 N, and at the same force range the fundamental frequencies are measured around 42.0 Hz, at which the relatively big displacements are observed at the 7th span. The results from the modal tests and the FE analyses are compared by both modal assurance criteria (MAC) values and mode shapes. The MAC values at 2nd, 4th, and 7th mode are below 50%. It is believed that the reason of the low MACs at those modes is that the vibration amplitudes of the modes are more distorted by the excitation force than those of the other modes.

1. 서 론

가압경수로(pressurized water reactor; PWR)용 핵연료집합체(fuel assembly)의 지지격자(spacer grid)는 원자로 내에서 핵연료봉을 지지하고, 지진과 같은 외부 하중으로부터 핵연료 봉을 보호하며 원자로 긴급냉각이 가능하도록 충분한 구조강도를 갖추어야 하는 중요한 구조물이다. 이러한 지지격자의 기계/구조적 성능을 검증하는 기본 시험으로는 지지격자 스프링 특성시험, 지지격자체에 대한 충격 및 좌굴시험, 연료봉 지지부위에 대한 프레팅 마멸시험, 연료봉 지지성능시험 그리고 진동시험 등이 있다[1~3]. 지지격자로 지지된 핵연료봉은 원자로내 가압된 냉각수의 유동으로 인하여 유체유발진동(flow induced vibration; FIV)이라고 불리는 진동이 발생하게 된다. 이러한 냉각재 유동에 의해 유발된 진동은 핵연료봉과 이것을 지지하는 지지스프링(지지격자 스프링) 사이에 상대운동을 일으키고, 이러한 상대운동에 의하여 핵연료봉 표면에 프레팅 마멸이 발생하며, 심한 마멸은 핵연료봉 피복관을 손상시켜 연료봉의 수명을 단축시키기도 한다. 따라서 핵연료의 한계수명까지 기계적인 원인에 의해 핵연료봉이 손상되지 않기 위해서는 지지격자 개발단계에서부터 연료봉과 지지격자 간의 거동에 대한 고려가 필요하다.

핵연료봉에 대한 이전의 연구결과에 의하면, 프레팅 마멸을 일으키는 원인은 연료봉을 고정시키는 지지스프링이 본래의 기능을 잃어버려 핵연료봉과 지지스프링 사이에 틈이 생기면서 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 새로운 지지격자를 개발할 때 핵연료봉과 지지격자 스프링사이에 틈이 발생하지 않도록 지지스프링의 성능을 검증하는 절차가 필요하다. 검증절차는 원자로 실제 운전을 통하여 수행하는 방법도 있으나, 핵 발전설비의 특성상 매우 난이하고 위험한 작업이므로, 실제모델을 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 검증에 대한 연구가 수행되고 있다[4~6].

최근에 개발된 여러 지지격자 중에서 성능이 우수한 것으로 평가된 최적화 H형과 새 이중판 지지격자로 지지된 모의 연료봉에 대한 진동특성이 연구된 바 있으며[7~9], 4개의 지지격자로 지지된 2.19 m의 연료봉에 대한 가진하중, 공기중 및 수중에서의 진동특성이 언급되었다. 본 연구에서는 이전의 연구와 비교할 때, 실제 경수로용 핵연료로 사용되는 것과 동일한 크기의 길이가 3.847 m로 길어지고, 8개의 최적화 H형 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 공기중 진동특성에 대하여 기술한다. 일반적으로 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동거동은 가진하중의 증가에 따라서 변위는 증가하고 고유진동수는 감소하는 비선형 특성을 보이는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 이를 확인할 수 있었다. 해석적 모달해석을 위하여 모델의 생성 및 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[10]를 이용하였고, 실험적 모달해석은 I-DEAS[11] 시험모듈인 TDAS를 사용하여 데이터의 획득 및 분석을 수행하였다.

2. 해석모델

Fig. 1은 연속 지지된 보의 형태로 원자로 내에 놓여지게 되는 연료봉 모델의 H형 지지격자 지지부 형상을 나타내었다. 연료봉은 단일 평면에서 하나의 스프링(spring)과 그 반대쪽에 있는 두 개의 딤플(dimple)이라고 부르는 구조로 지지된다. 이러한 스프링과 딤플의 지지구조는 다시 90^{o} 돌아간 평면상에 한 세트(set)가 더 존재하기 때문에, 지지격자는 단일셀 당 2개의 스프링과 4개의 딤플로 연료봉을 지지하게 된다. Fig. 2는 5×5형 최적화 H형 지지격자체의 형상을 나타낸 것으로서, 연료봉을 감싸는 형상인 스프링 및 딤플을 특징으로 하고 있으며, 기존의 H형 스프링 부착 지지격자의 장점에 스프링 지지부의 탄성변형 한계를 확대시킨 것이다.

진동시험에 사용된 모의 연료봉의 기하학적 형상 및 치수는 Fig. 3과 같으며, 납봉으로 채워진 3.67 m 구간을 stack영역, 좌측 스프링이 있는 공간을 plenum영역이라 한다. Stack 영역에서 10.4 g/cm^{3}의 밀도를 갖는 UO_2 소결체는 11.4 g/cm^{3}의 밀도를 갖는 납봉으로 대체하여 제작하였다. 시험봉의 피복관과 상,하단 봉단마개 그리고 plenum 스프링 등 소결체를 제외한 모든 부품은 실제 연료봉의 부품을 사용하였다.

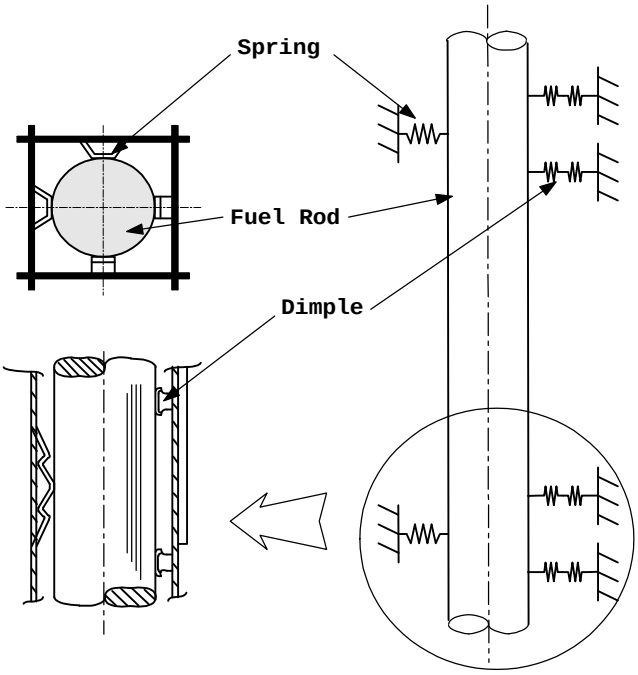
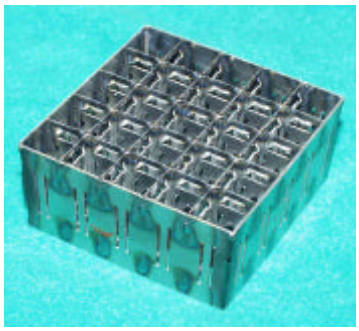


Fig. 1 Fuel rod supported by spacer grid

(a) Unit cell



(b) 5x5 OHT spacer grid

Fig. 2 Shape of Optimized H type spacer grid

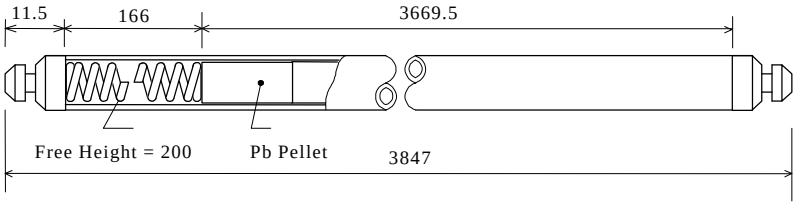


Fig. 3 Dimensions of the dummy fuel rod (unit: mm)

3. 진동시험 및 유한요소해석

핵연료봉 지지거동 및 진동특성 해석을 위해 사용한 주요 장비 및 센서는 Agilent VXI Front End system, 가진기, 가속도계, 갭 변위 센서, I-DEAS TDAS 등이 있다. 시험에 사용한 연료봉의 길이는 3.847 m이고, 이들은 Fig. 4에서와 같이 처음 여섯 구간은 0.522 m, 마지막 구간은 0.62 m의 간격으로 8개의 지지격자가 연료봉을 지지하도록 구성되었다. 가진기는 연료봉의 가운데인 네 번째 구간의 3/4지점에 부착하여 가진하였고, 가속도계는 지지격자 사이의 한 구간에 1개(중앙) 혹은 2개(1/4과 3/4 지점)를 부착하였으며, 최대 변위가 예상되는 네번째 구간의 중앙에는 갭 변위센서를 이용하여 변위를 측정하였다. 시험은 공기중에서 가진력이 조절되는 가진기로 연료봉을 20~125 Hz 범위에서 sine sweep하며, 11개의 가속도계에서 측정된 신호를 I-DEAS의 TDAS를 이용하여 고유진동수, 모드형상, 해석결과와의 상호관계 등을 분석하였다. 또한 Fig. 5는 실험적 모달해석에 대한 개략도를 나타내었다.

시험결과의 비교를 위하여 유한요소해석 프로그램, ABAQUS를 이용한 자유진동해석을 수행하였다. 연료봉은 ABAQUS의 2절점 선형 요소(B21)를 이용하여 모델링하였고, 지

지격자 스프링과 딤플은 2D 스프링 요소(SPRINGA)를 사용하였으며, 모달해석은 Lanczos 방법을 이용하였다. 스프링 요소로 모델링된 지지격자 스프링과 딤플의 강성은 실험을 통하여 얻은 값을 사용하였는데, 최적화 H형 지지격자의 스프링과 딤플의 강성은 각각 128 N/mm와 506 N/mm이다[7]. 유한요소해석에서 지지격자 스프링과 연료봉 사이에서 실제 발생하는 마찰에 의한 영향과 접촉부위에서 발생하는 감쇠 등은 무시하였다. 해석에 사용된 Zircaloy-4 재료의 기본물성으로서 탄성계수는 108.3 GPa, 프와송비는 0.294 그리고 밀도는 6.6 g/cm^{3}이다. 또한 Stack영역에 대해서 Pb 소결체는 연료봉의 강성에 미치는 영향보다는 질량의 효과가 훨씬 크기 때문에 이들 소결체를 추가질량으로 고려하였고 연료봉의 밀도가 증가한 것(43.37 g/cm^3)으로 하여 해석을 수행하였다.

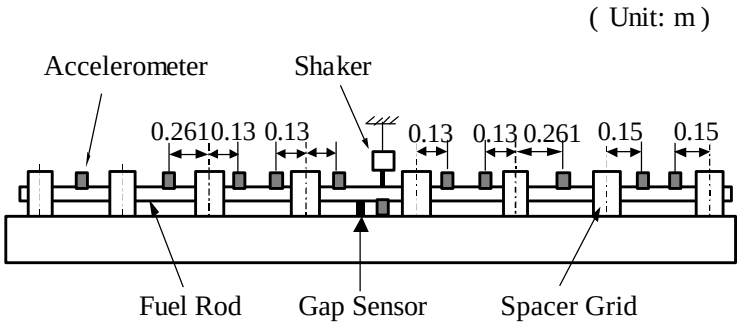


Fig. 4 Installation position of sensors

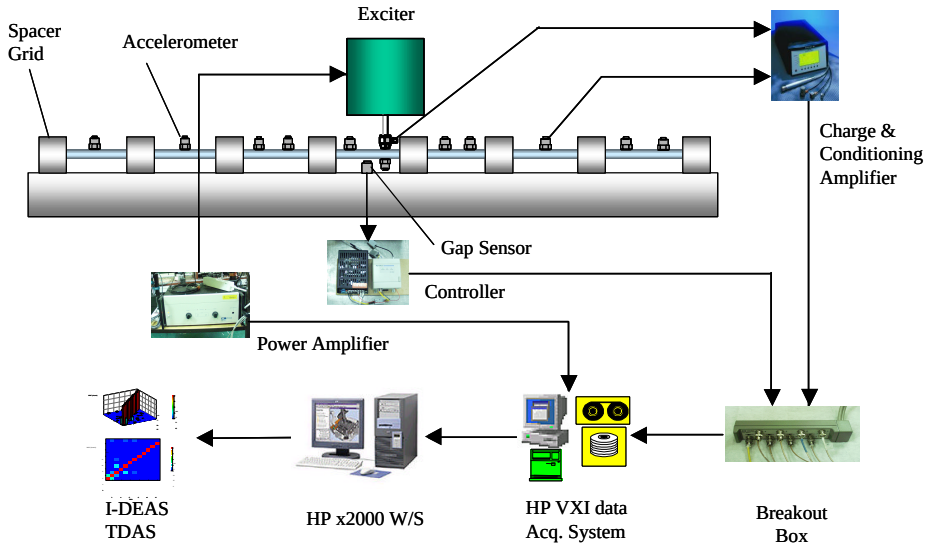


Fig. 5 Schematic diagram of an experimental modal testing

4. 결과 및 고찰

핵연료봉은 원자로내 운전상태에서 대략 0.2 mm 정도의 최대변위를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 본 시험에서는 어느 정도의 하중이 운전상태와 유사할 것인가를 판단하기 위하여 최대 변위가 예상되는 연료봉의 중앙 가진점 주위에 갭 센서를 이용하여 변위를 얻었다.

Table 1은 최적화 H형 지지격자로 지지된 연료봉의 네 가지 가진하중(0.1 N, 0.2 N, 0.3 N, 0.4 N) 조건에서 RMS 단위의 변위결과를 나타내었고, Fig. 6은 연료봉의 네번째 구간의 중앙에서 갭센서를 이용하여 측정한 가진력 0.3 N에서 주파수영역에서의 변위이력을 나타내었다. 최대변위는 기본진동수에서 발생하는 것이 아니라 고차 모드에서 발생하였고, 기본진동수에서의 변위값은 상당히 작은 값을 보였다. 실제로 기본진동수는 620 mm의 가장 긴 스팬 길이를 갖는 7번째 구간의 1차 굽힘 거동이 지배적인 모드이고, 이곳에서 변위를 측정한 결과, 중앙에 비해 변위가 무시할 정도로 작았다. 그 이유는 비록 이 구간에서 기본진동수가 나타나기는 하지만 가진점에서 멀리 떨어진 구간이기 때문에 변위가 작게 나타나는 것으로 생각된다. 가진력이 0.1 N으로 작았을 때에는 5차 모드인 58.28 Hz에서 0.114 mm의 최대변위를 보였으나, 하중이 증가함에 따라 최대변위는 증가하였고, 0.2 N 이상이 되면 2차 모드에서 최대변위를 보였다. 또한 작용하중이 커짐에 따라 변위 값은 커지고, 최대변위가 발생하는 점의 진동수가 낮아짐을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 비선형 특성을 지닌 구조물의 전형적인 현상으로 연료봉을 지지하고 있는 지지격자 스프링은 작용하중이 증가함에 따라 연화되는 비선형 특성을 지님을 간접적으로 나타낸다[7,8]. 이상의 변위 결과로부터 0.2 mm에 근접한 변위를 일으키는 가진하중은 0.191 mm의 최대변위를 보인 0.2 N으로서, 수중에서 변위가 약간 증가할 것을 고려한다면 0.2 ~ 0.3 N 정도의 하중으로 수행한 시험결과를 통하여 고유진동수와 모드형상을 예측하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Table 1. Displacement of the fuel rod with force levels

Disp. / Force	Max. disp.(mm) / Freq.(Hz)	Disp.(mm) / Fund. freq.(Hz)
0.1 N	0.114 / 58.28	0.020 / 42.05
0.2 N	0.191 / 48.60	0.036 / 41.72
0.3 N	0.216 / 47.42	0.056 / 41.98
0.4 N	0.253 / 46.93	0.082 / 41.99

본 실험에서는 11개의 가속도계를 이용하여 고유진동수와 모드형상을 얻었는데, 시험을 통하여 얻은 결과들 중에서 Fig. 7과 8은 각각 0.3 N의 하중 작용시 절점 #10(7번째 구간의 첫 번째 가속도계)에서의 주파수응답함수(frequency response function: FRF)와 실수부(real)/허수부(imaginary)의 스펙트럼을 나타낸 것으로 이를 통하여 고유진동수를 판별한다.

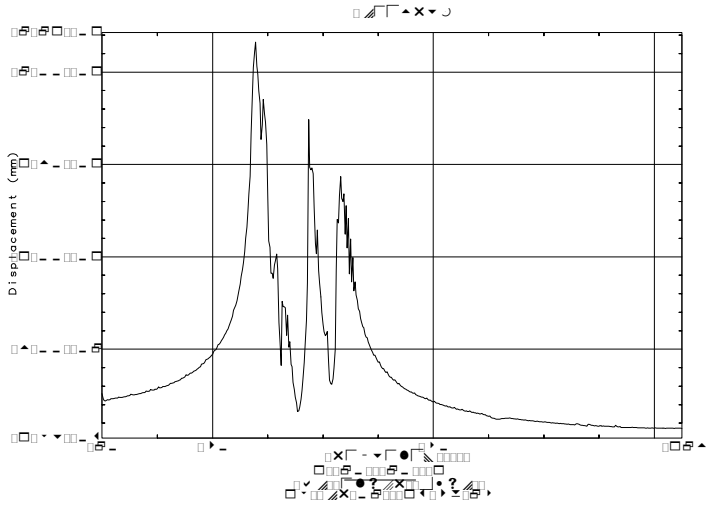


Fig. 6 Measured displacement of the fuel rod for the force level, 0.3 N

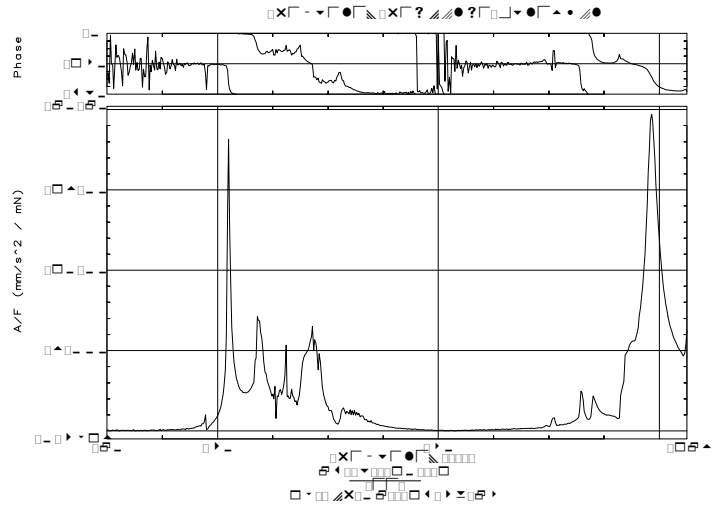


Fig. 7 Frequency response function for the force level, 0.3N at node #10

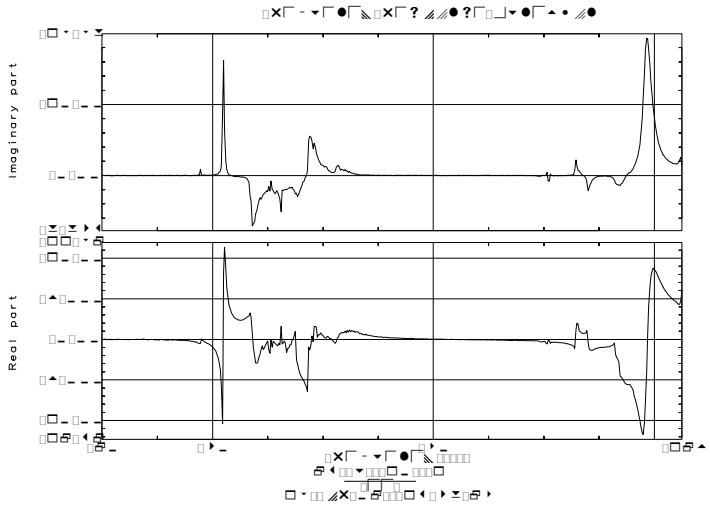


Fig. 8 Real and imaginary part for the force level, 0.3 N at node #10

Table 2는 시험하중에 따른 유한요소해석과 시험을 통한 고유진동수와 모달신뢰기준 결과의 비교를 처음 8차 모드까지에 대해서 나타내었다. Table에서 Error는 시험과 해석 결과의 백분율 차를 나타내고 있으며, 해석결과는 자유진동 해석결과이기 때문에 작용하중의 변화에 따라 동일한 값을 이용하여 비교하였다. 최적화 H형 지지격자로 지지된 연료봉의 경우에 기본진동수(fundamental frequency)는 약 42.0 Hz를 보였고, 시험하중이 증가함에 따라 기본진동수는 크게 차이가 없으나, 최대변위가 발생하는 2차 모드와 고차 모드에서의 고유진동수는 전체적으로 약간씩 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 5개의 지지격자로 지지된 2.19 m 연료봉에 대한 진동거동에 대하여 언급된 이전의 연구결과[8]와도 잘 일치하는 것이다.

일반적으로 실험적 모달시험과 이론적 모달해석을 통한 두 결과의 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, 5% 이하의 값에 대해서는 전혀 다른 모드로 평가할 수 있다[12]. Fig. 9는 시험하중 0.3 N에서의 시험과 해석결과 사이의 모드의 관계를 나타내는 MAC 그래프이고, Fig. 10은 모드형상의 비교를 나타내었다. MAC값과 Fig. 10의 모드형상 비교를 보면, 전체적으로 1차와 8차 모드를 제외하고는 두 모드들 간의 신뢰성이 그리 높지 않음을 알 수 있다. 이것은 모드형상의 비교에서 알 수 있듯이 각 구간에서 갖는 고유벡터의 크기가 다르기 때문으로 생각된다. 즉, 각 구간에서의 모드와 위상각의 변화는 잘 일치하지만, 구간에서의 변위의 크기, 특히 모드형상의 비교에서 좌측부분에서는 두 결과의 모드들 간의 크기에 큰 차를 보이고 있다. 또한 이러한 현상은 가진기의 가진력이 일부 모드를 왜곡시켜 모드들 간의 신뢰성을 떨어뜨리고 있는 것으로 생각된다.

Table 2. Comparison of natural frequencies and MAC values with force levels

Excitation Forces(N)	Mode	Natural Frequencies (Hz)		Error(%)*	MAC Value(%)
		Test	FE Analysis		
0.1	1	42.05	36.42	13.4	0.928
	2	49.55	41.58	16.2	0.382
	3	52.48	44.03	16.1	0.753
	4	55.96	48.13	14.0	0.458
	5	58.28	53.28	8.5	0.522
	6	61.41	58.35	4.9	0.531
	7	63.51	62.49	1.6	0.416
	8	118.4	108.4	8.4	0.990
0.2	1	41.72	36.42	12.7	0.929
	2	48.60	41.58	14.4	0.370
	3	51.90	44.03	15.2	0.777
	4	55.79	48.13	13.7	0.464
	5	58.06	53.28	8.2	0.520
	6	61.23	58.35	4.7	0.549
	7	62.86	62.49	0.6	0.396
	8	118.3	108.4	0.8	0.990
0.3	1	41.98	36.42	13.2	0.936
	2	47.42	41.58	12.3	0.234
	3	52.16	44.03	15.6	0.742
	4	54.81	48.13	12.2	0.402
	5	57.55	53.28	7.4	0.526
	6	60.20	58.35	3.1	0.457
	7	62.68	62.49	0.3	0.445
	8	118.8	108.4	8.7	0.991
0.4	1	41.99	36.42	13.1	0.931
	2	46.93	41.58	11.4	0.210
	3	51.88	44.03	15.1	0.759
	4	53.60	48.13	10.2	0.280
	5	57.79	53.28	7.8	0.470
	6	59.27	58.35	10.1	0.363
	7	62.27	62.49	-0.4	0.430
	8	118.9	108.4	8.8	0.991

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

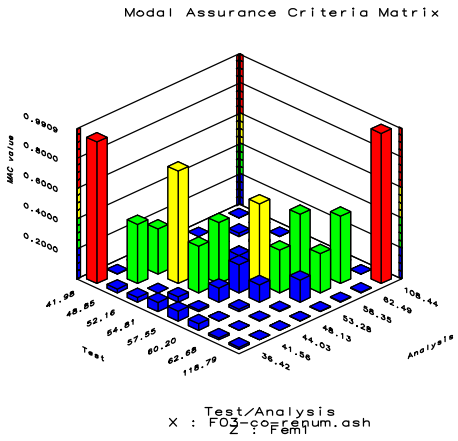


Fig. 9 MAC values between test and FE analysis results for the force level, 0.3 N

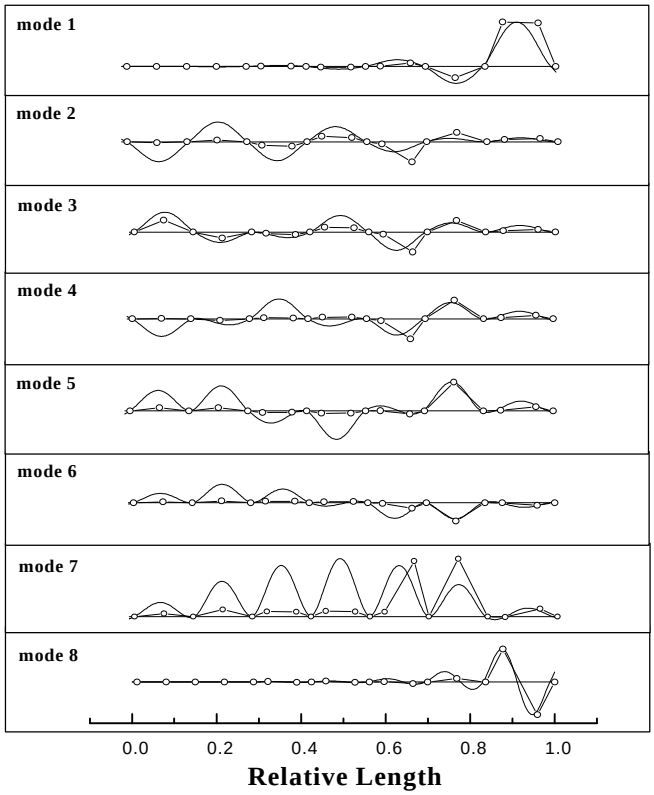


Fig. 10 Comparison of mode shapes between test and FEA results for the force level, 0.3 N

5. 결 론

최적화 H형 지지격자 8개로 연속 지지된 경수로용 모의 핵연료봉에 대하여 I-DEAS TDAS를 이용하여 데이터를 획득/분석하고, ABAQUS를 이용한 유한요소해석을 통하여 고유진동수 및 모드형상을 얻었으며, 이들 두 결과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 8개의 최적화 H형 지지격자로 지지된 3.847m의 모의 연료봉에 대한 최대변위는 가진기의 가진력이 0.1 N으로 작았을 때는 5차 모드인 58.28 Hz 에서 0.114 mm를 보였으나, 가진력이 증가하면서 2차모드에서 최대 변위가 발생하였고, 0.3 N 작용시 0.216 mm의 변위를 보였다.
(2) 경수로용 모의 연료봉에 대한 기본진동수는 약 42.0 Hz를 보였고, 가진하중의 증가에 따라서 기본진동수는 거의 변화가 없었으나 고차모드에서는 약간씩 감소하는 경향이 뚜렷하여, 기존의 연구결과에서 보고된 핵연료봉의 비선형 진동특성을 확인할 수 있었다.
(3) 진동시험과 유한요소해석 결과의 비교에서, 시험결과는 해석결과에 비해 평균 10% 정도 높은 값을 보였으며, 1차와 8차 모드를 제외하고는 두 모드들 간의 신뢰성이 그리 높지 않았다. 이것은 각 구간에서의 모드와 위상각의 변화는 잘 일치하지만, 각 구간에서의 진폭의 크기가 다르기 때문이며, 가진기의 가진력도 일부 모드를 왜곡시켜 모드들 간의 신뢰성을 떨어뜨리고 있는 것으로 판단된다.
(4) 이들 진동특성은 지지조건 변화에 따른 진동거동의 예측 및 원자로 내 연료봉의 냉각 유체에 의한 공진 가능성 등 유체유발진동 해석에 유용한 데이터로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능지지격자구조기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. H.S. Kang, et al., 2001, “Evaluation of Spacer Grid Support Performance by Vibration Test”, KAERI/TR-1738/2001, 한국원자력연구소.

2. 윤경호 외 3인, 2001, “지지격자 스프링/딤플의 기계적 특성시험 및 유한요소 해석”, KAERI/ TR-1763/2001, 한국원자력연구소.
3. 윤경호 외 7인, 1998, “일체형 원자로용 지지격자 시편의 기계적 성능평가 시험”, KAERI/TR-1147/98, 한국원자력연구소.
4. 강흥석 외 4인, 2001, “경수로 핵연료집합체 지지격자로 지지된 핵연료봉의 진동해석”, KAERI/TR-1753/2001, 한국원자력연구소.
5. H.S. Kang, et al., 2001, “Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure”, J. of KNS, Vol.33, No.1, pp.73~82.
6. 이상설 외 7인, 2000, “연료봉 지지거동 및 진동해석 모델검증시험”, KAERI/CM-328/99, 한국항공우주연구소.
7. 최명환 외 5인, 2002, “최적화 H형 및 새 이중판 지지격자로 연속 지지된 모의 연료봉의 진동해석”, KAERI/TR-2063/2002, 한국원자력연구소.
8. 최명환, 강흥석, 송기남, 정연호, 2002, “지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동해석”, 대한기계학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, pp.7~12.
9. 최명환, 강흥석, 송기남, 윤경호, 김형규, 2002, “접촉해석이 연계된 스프링 지지보의 진동해석”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp.1216~1221.
10. H.D. Hibbit, G.I. Karlsson and E.P. Sorensen, 1999, "ABAQUS/Standard Users Manual", Ver 5.8, HKS Inc., RI, USA.
11. SDRC, 2000, "I-DEAS Master Series™", Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
12. D.J. Ewins, 1984, "Modal Testing: Theory and Practice", Jone Wiley & Sons Inc.., New York.