

# 새이중판 지지격자로 지지된 경수로용 연료봉의 진동특성 Vibration Characteristics of the PWR Fuel Rod Supported by New Doublet Spacer Grids

최명환\* · 강홍석\*\* · 윤경호\*\* · 김형규\*\* · 송기남\*\*

M.H. Choi, H.S. Kang, K.H. Yoon, H.K. Kim and K.N. Song

**Key Words:** Vibration(진동), New Doublet(새이중판), Fuel Rod(연료봉), Spacer Grid(지지격자), Contact(접촉)

## ABSTRACT

One of the methods that are used to compare and verify the supporting performance of the spacer grids developed is the vibration characteristic test. A modal test in this paper is performed for a dummy rod 3,847 mm tall supported by eight New Doublet (ND) spacer grids. For the vibration test in air, nine accelerometers, one displacement sensor and one shaker are used for acquiring signals, and an I-DEAS TDAS software is employed for analyzing the signals. Also, a finite element (FE) analysis is performed by a beam-spring simple model and a contact model simulating the contact phenomenon between the rod and the ND spring. And then, the result of the FE analysis is compared with that of the modal test. The natural frequencies as well as the mode shapes calculated by the proposed contact models have a greater similarity to the test results than those by the previous beam-spring model. In addition, for grasping whether or not the modal parameters are influenced by where shaking spot is, two kinds of tests are performed; one is for the shaker attached at the fourth span (center), the other is for the shaker at the fifth span that is one span nearer to the bottom of the rod. The latter shows higher MAC than the former. Finally, the vibration displacements are measured in the range of 0.112~0.214 mm for the excitation force of 0.25~0.75 N.

## 1. 서 론

가압경수로용(pressurized water reactor; PWR) 핵연료집합체(fuel assembly)의 지지격자 (spacer grids; SGs)는 원자로 내에서 핵연료봉(fuel rod)을 지지하고, 지진과 같은 외부 하중으로부터 핵연료 봉을 보호하며 원자로 긴급냉각이 가능하도록 충분한 구조강도를 갖추어야 하는 중요한 구조물이다.<sup>(1)</sup> 핵분열하는 UO<sub>2</sub> 소결체(pellet)가 장입된 핵연료봉에는 원자로내 가압된 냉각수의 유동으로 인하여 유체유발진동(flow induced vibration; FIV) 현상이 발생하게 된다.<sup>(2-4)</sup> 이러한 현상은 일종의 열교환기인 핵연료봉 주위로 냉각재인 물이 가압된 상태에서 빠른 속도(5~6 m/s)로 유동하기 때문이며, 펌프에 의해 순환되는 냉각수는 펌

프에서부터 원자로에 도달하는 동안 여러 구조물의 상호작용을 거치게 되어, 결국 원자로내에는 0~50 Hz 사이의 광대역 진동원이 되는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 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 수명을 단축시키기도 한다. 따라서 핵연료의 한계수명(3~5년)까지 기계적인 원인에 의해 핵연료봉이 손상되지 않도록 하기 위해서는 지지격자 개발단계에서부터 연료봉과 지지격자 간의 거동에 대한 고려가 필요하다.

한국원자력연구소에서는 그동안 우리 고유의 지지격자 모형들을 도출하고 개발과 관련하여 기계/구조적 기반기술연구, 지지격자 스프링 특성시험, 충격 및 좌굴, 프레팅 마멸시험 등 성능검증을 위한 연구를 수행하여 왔다.<sup>(6-9)</sup> 또한 노내에서의 지지격자 스프링 지지된 연료봉의 진동거동을 예측하기 위하여 실제모형을 근사화한 이론적 모델의 개발 및 시험을 통

\* 정회원, 한국원자력연구소  
E-mail : cmh2002@orgio.net  
Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565

\*\* 한국원자력연구소

한 검증에 대한 연구가 수행되었다.<sup>(10-12)</sup> 최근에는 그동안 개발된 많은 지지격자들 중에서 기계/구조적 성능이 우수한 것으로 평가된 최적화 H형 (Optimized H type; OHT)과 새이중판 (New Doublet; ND) 지지격자를 주 후보로 선정하여 집중적인 연구가 수행되고 있다.<sup>(13,14)</sup> 이전의 연구결과에서 언급된 바와 같이 새이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 진동에 대해서 보 (beam)와 스프링 (spring) 요소를 이용한 유한요소 단순 모델은 시험 진동모드와 어느 정도 일치하였으나, 진동수에 있어서 큰 차이가 있었다. 따라서 이러한 차이를 줄이기 위하여 지지격자와 연료봉 사이의 면 접촉 (area contact)을 고려한 해석모델을 개발하였으며, 5개의 새이중판 지지격자로 지지된 2,189 mm 연료봉에 대하여 좋은 결과를 보인바 있다.<sup>(14)</sup>

본 연구에서는 8개의 새이중판 지지격자로 지지된 3,847 mm 모의 연료봉에 대한 진동특성을 파악하는데 근본적인 목적이 있으며, 이를 위하여 개발된 접촉을 고려한 유한요소 해석모델을 적용하였고, 진동시험 결과와 비교/검토하였다. 수치적 방법에 의한 진동해석은 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS<sup>(15)</sup>로 수행하였으며, 유한요소해석 결과와 진동시험 결과의 비교/분석은 I-DEAS<sup>(16)</sup>의 시험 모듈인 TDAS로 수행하였다. 또한 공기중에서 수행한 진동시험은 가진력에 따른 변위와 고유진동수의 변화를 얻기 위하여 랜덤 (random), 0.25 N, 0.5 N, 0.75 N의 가진력이 고려되었고, 시험에서 가진 위치의 영향을 평가하기 위하여 연료봉의 중앙구간과 이웃한 구간에서 가진하는 경우의 시험결과를 통하여 가진위치가 연료봉의 고유진동수와 모드에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 진동시험

### 2.1 시험

본 연구에서 고려한 새이중판 지지격자의 5×5형 부분 격자체 형상과 단위셀의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 새이중판 지지격자는 기존의 이중판 노즐형 지지격자에 기초하여 개발된 것으로서 연료봉을 지지하는 스프링 강성을 적절하게 완화시킨 것이다. 스프링 강성의 완화책으로서 스프링 양편에 슬롯(slot)을 두어, 스프링 강성을 설계자 의도대로 완화시키고 접촉면에서의 마멸특성도 크게 향상시킨 것이다.

연료봉 시험편은 3,847 mm 길이를 갖는 경수로용 모의 연료봉이며, 실제 핵연료봉과 다른 점은 10.4 g/cm<sup>3</sup>의 밀도를 갖는 UO<sub>2</sub> 소결체를 11.4 g/cm<sup>3</sup>의 납봉으로 대체하여 제작한 것 뿐이고, 소결체를 제외한 모든 부품은 실제 핵연료봉의 부품을 사용하였다.

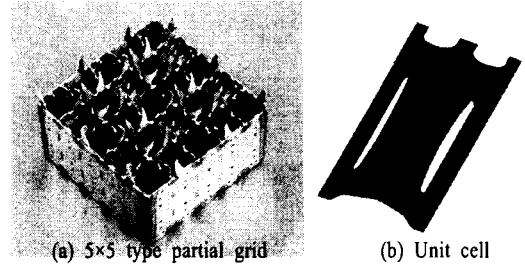


Fig. 1 Shape of New Doublet spacer grids

### 2.2 시험개요

시험에 사용된 연료봉이 지지격자에 의해서 지지된 상태에서의 전체적인 형상을 Fig. 2에 나타내었는데, 이들은 처음 여섯 개의 구간(Span #1 ~ #6)은 522 mm, 마지막 한 개의 구간(Span #7)은 620 mm의 간격으로 모두 8개의 지지격자가 연료봉을 지지하고 있다. 또한 연료봉은 5×5형 부분 격자체의 정 중앙에 설치된 상태에서 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 진동시험을 위한 가속도계의 부착위치, 가진기 및 변위센서의 위치를 나타내었다. 가진기는 연료봉의 중앙구간(Span #4)의 좌측으로부터 3/4 지점에 부착하여 가진하였다. 또한 가진점 위치의 영향을 고찰하기 위하여 가진점의 위치를 Span #5로 옮겨 측정하기도 하였다. 가속도계는 가진구간과 7번째 구간의 1/4과 3/4 지점에 각각 2개, 나머지 구간의 중앙에 1개의 가속도를 부착하여 총 9개를 사용하였다. 마지막으로 변위는 최대변위가 예상되는 가진기가 설치된 구간의 중앙에 비접촉식 갭센서(gap sensor) 1개를 사용하여 측정하였다.

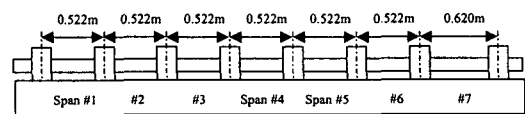


Fig. 2 Schematic view of the test specimen

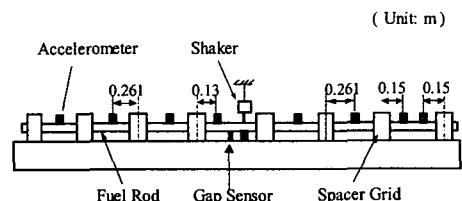


Fig. 3 Measurement positions

진동시험은 가진기를 이용한 Sine Sweep을 통하여 수행하였고, 센서로부터의 신호는 B&K Nexus 앰프를 통하여 Data Acquisition System(VXI HP7500 Series B)에 연결되며, 이들 신호는 HP x2000 W/S에 설치되

어 있는 I-DEAS의 TDAS에서 데이터 획득 및 후처리를 하였다.

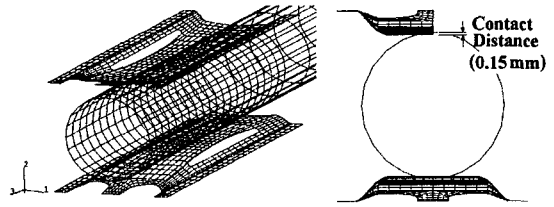
### 3. 유한요소해석

새이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 유한요소모델에 있어서 보와 스프링 요소를 이용한 단순모델은 기본진동수에 있어서 실험결과와 30% 이상의 큰 오차를 보였다.<sup>(13)</sup> 이것은 실제로 새이중판 지지격자가 연료봉과 초기 설치 상태에 0.15 mm의 접촉거리를 갖도록 설계된 면접촉을 하는 구조물인데 이를 단순한 보와 스프링으로 보았기 때문이라 판단되었다. 따라서 저자들은 새이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 위하여 I-DEAS와 ABAQUS를 이용한 3차원 기하형상을 모델하고, 양단 스프링 지지된 단일구간의 570 mm 연료봉과 5개의 지지격로 지지된 2,189 mm 연료봉에 접촉해석을 고려한 모달해석을 수행하여 좋은 결과를 얻은 바 있다.<sup>(14)</sup> 본 논문에서는 접촉해석 모델을 8개의 지지격자로 지지된 3,847 mm 연료봉의 해석에 적합하도록 수정하였으며, 여기서는 그 과정을 간략히 언급하고, 결과에 대하여 기술하도록 한다.

Fig. 4는 보와 스프링 요소를 이용한 단순모델을 나타내고 있는데, 연료봉은 ABAQUS에서 제공하는 2절점 선형 요소(B21)를 이용하여 모델링하였고, 지지격자 스프링은 2D 스프링 요소(SPRINGA)를 사용하였다. 이때 해석에서 스프링의 강성은 실험을 통하여 얻은 값, 114 N/mm을 이용하였다.<sup>(13)</sup> Fig. 5(a)는 연료봉과 스프링이 접촉하는 부분을 상세히 나타낸 4절점 탄소성 셸요소(S4R)를 이용한 유한요소해석 모델이고, (b)는 연료봉과 스프링의 초기 접촉거리(contact distance)를 보여주고 있다. 연료봉이 지지격자체에 삽입되면 스프링은 한쪽 접촉면에 대하여 약 0.15 mm의 접촉거리를 갖도록 설계되었다. 따라서 접촉해석은 접촉거리를 초기 간섭량으로 하고, 연료봉을 master, 스프링을 slave로하여 접촉면을 지정하고, 두 접촉면 사이의 미끄럼 문제를 푸는 기능을 사용하였다. 모델에서의 경계조건은 스프링의 양 경계에 대하여 연료봉의 길이 방향으로 회전을 제외한 모든 자유도를 구속하였다. 또한 연료봉의 한쪽 방향으로의 모드만을 살펴보기 위하여 좌우 방향의 변위를 구속하였다.



Fig. 4 Beam-Spring model of the fuel rod 3,847 mm tall



(a) Detail of contact part (b) Contact distance

Fig. 5 Finite element contact model

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 변위

Table 1은 가진하중(0.25 N, 0.5 N, 0.75 N)과 가진 위치(Span #4, Span #5)에 따른 변위 결과를 나타내었다. 측정위치에 따라 값에는 약간 차이가 있지만, 대체적으로 Span #4와 #5 구간에서 측정된 값은 각각 2차 모드인 54 Hz와 55 Hz 근처에서 0.112~0.214 mm 범위의 변위를 보였다. 또한 원자로 내에서 냉각수 유동에 의해서 예상되는 최대 0.2 mm 정도의 변위를 보이는 하중은 약 0.7~0.8 N 정도로 판단되며, 가진하중이 커짐에 따라 변위는 증가하고, 기본진동수나 최대변위가 발생하는 점의 진동수는 거의 변화가 없었다.

Table 1 Displacements of the fuel rod supported by ND SGs with various excitation forces

Disp. Force	Excitation: Span #4		Excitation: Span #5	
	Max. Disp. (mm)	Freq. (Hz)	Max. Disp. (mm)	Freq. (Hz)
0.25 N	0.139	54.7	0.112	55.4
0.50 N	0.158	54.1	0.171	55.4
0.75 N	0.214	53.5	0.183	55.2

### 4.2 고유진동수 및 모드형상

새이중판 지지격자로 지지된 3,847 mm 모의 연료봉의 진동특성을 얻기 위하여, 접촉해석을 연계해 개발된 유한요소모델을 적용한 결과와 시험결과를 비교/고찰하였다. 결과들은 연료봉의 고유진동수, 모드형상, 시험과 해석결과의 모드의 상호관계를 나타내는 모달확신기준(MAC) 값으로 나타내었고, 시험시 가진 위치에 대한 영향에 대하여 기술하였다.

#### (1) Span #4 가진시

Table 3은 중앙구간(Span #4)을 랜덤 가진하는 경우 보-스프링 요소를 사용한 결과와 접촉모델을 사용한 모델에 대한 결과를 함께 나타내었다. 기본진동수에

있어서 보-스프링 모델은 33.6%의 오차를 보였으나, 접촉모델에서는 0.6%의 오차로 시험결과와 잘 일치하였다. 고차모드에서도 단순모델은 큰 차이를 보였으나 접촉모델은 최대 1.58%로 접촉모델이 시험결과를 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있다.

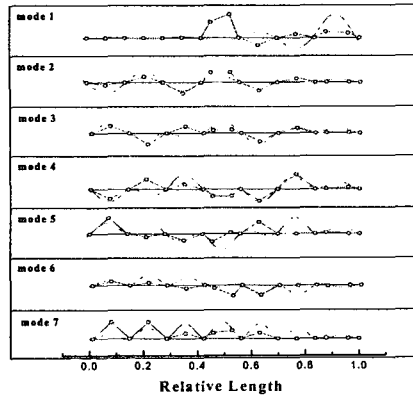
Fig. 6은 랜덤 하중하에서 시험과 보-스프링 단순모델을 통한 모드형상의 비교를 나타내었다. 기본진동수의 모드는 길이가 620 mm인 Span #7에서의 1차 굽힘모드가 지배적임을 유한요소해석으로부터 확인할 수 있다. 그러나 시험에서는 가진점에서 진폭이 크고, 다른 구간에서는 변위의 방향이나 크기가 다르게 나타나고 있다. 이로 인하여 기본진동수에서의 MAC 값은 zero에 가까운 값을 보이고 있다. 일반적으로 MAC값은 시험과 해석에서 얻은 두 고유벡터의 상관관계를 나타내는 것으로서 1.0(혹은 100%)에 근접할수록 동일한 모드임을 나타낸다. 이러한 결과는 접촉을 고려한 유한요소 모델에서도 나타나고 있으며, 이는 시험과 접촉모델 사이의 MAC 그래프를 나타낸 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

이와 같이 접촉을 고려한 모델을 통하여 고유진동수를 개선할 수 있었으나, 모드형상에 있어서는 아직도 기본진동수에서 차이가 많음을 알 수 있다. 그 이유는 유한요소 해석상의 문제가 아니라 시험상의 문제로 판단되었다. 즉, Span #4를 가진하는 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 시험 모드형상에 다소 왜곡이 발생하며, 해석결과와 모드의 상관관계에 신뢰성이 떨어지고 있는 것이다. 따라서 이를 해결하기 위해서 가진점을 달리하는 방법을 적용하였으며, 기본진동수의 모드가 크게 나타나는 Span #7에 가까운 구간으로 가진점을 옮김으로서 기본진동수에서의 모드를 개선할 수 있었다.

Table 3 Natural frequencies and MAC values of the fuel rod supported by ND SGs under the random excitation force at Span #4

Mode	Test	Beam-Spring model			Contact model		
		Freq.	MAC	Error*	Freq.	MAC	Error*
1	43.39	28.8	0.020	33.6	43.64	0.050	-0.60
2	55.96	32.9	0.569	41.2	55.51	0.916	0.79
3	58.16	36.3	0.470	37.6	57.24	0.964	1.58
4	59.90	41.6	0.525	30.1	59.68	0.874	0.38
5	62.06	47.9	0.474	22.8	62.29	0.856	-0.38
6	64.29	54.1	0.580	15.8	64.55	0.729	-0.38
7	65.27	59.1	0.652	4.8	66.01	0.841	-1.14

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



C33-SY-Random

Fig. 6 Comparison of mode shapes of the fuel rod supported by ND SGs obtained by the test and the beam-spring FE analysis (Span #4, random)

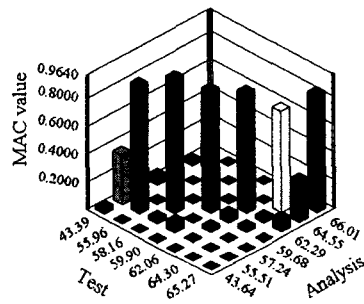


Fig. 7 MAC values between the test and the contact FE analysis of the fuel rod supported by ND SGs under the random excitation at Span #4

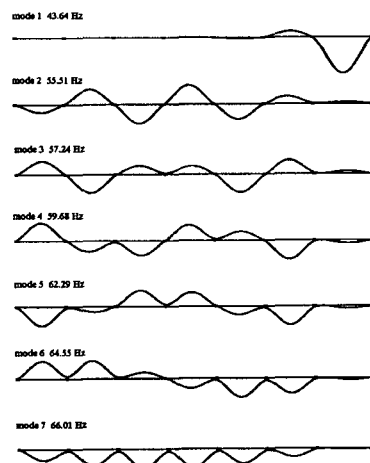


Fig. 8 Mode shapes of the fuel rod supported by ND SGs using the contact FE model

Fig. 8은 접촉해석을 연계한 진동해석 결과의 모드 형상을 보이고 있다. 전체적으로 보-스프링 모델의 모드형상은 비슷하지만, 3차와 4차 모드에 크게 차이가 있으며, 또한 보-스프링 모델에서 나타나는 Span #4(mode 6)와 Span #5(mode 5)에서의 2차 굽힘 모드가 접촉을 고려한 모델에서는 나타나지 않아, 시험결과와 더 유사한 결과를 보였다.

(2) Span #5 가진시

Table 4는 Span #5 를 랜덤 가진하는 경우의 시험과 단순모델, 시험과 접촉모델의 비교결과를 나타내었다. 기본진동수를 제외하고 전체적인 경향은 Span #4를 가진하는 경우와 큰 차이가 없다. 그러나 기본진동수의 모드에는 분명한 차이가 있는데, Span #4를 가진하는 경우 MAC값은 0.05로 두 모드는 서로 관계가 전혀 없는 것처럼 나타났다. 그러나 Span #5를 가진하는 경우 MAC값은 0.843을 보여 기본진동수의 모드를 정확하게 모사하고 있음을 Fig. 9의 MAC 그래프를 통하여 확인할 수 있다.

Table 4 Natural frequencies and MAC values of the fuel rod supported by ND SGs under the random excitation force at Span #5

Mode	Test	Beam-Spring model			Contact model		
		Freq.	MAC	Error*	Freq.	MAC	Error*
1st	43.09	28.8	0.731	33.2	43.64	0.843	-1.28
2nd	56.55	32.9	0.469	36.1	55.51	0.863	1.84
3rd	57.38	36.3	0.461	36.7	57.24	0.914	0.24
4th	60.10	41.6	0.440	30.8	59.68	0.947	0.70
5th	62.36	47.9	0.608	23.2	62.29	0.955	0.11
6th	63.76	54.1	0.445	15.2	64.55	0.714	-1.23
7th	65.06	59.1	0.760	9.2	66.01	0.897	-1.46

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

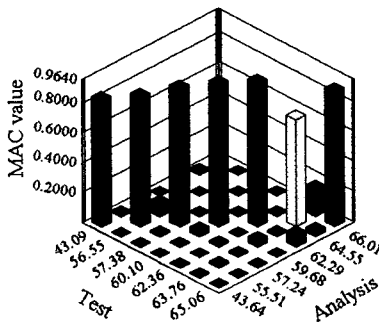


Fig. 9 MAC values between test and contact FE analysis of the fuel rod supported by ND SGs under the random excitation at Span #5

이러한 결과는 여러개의 동일한 스프링으로 지지된 연료봉의 경우, 가진 위치에 따라 모드형상을 정확하게 모사하지 못하는 경우가 발생할 수 있음을 보이는 것이다. 이 경우에는 기본진동수가 비교적 길이가 긴 Span #7에서의 굽힘모드가 지배적이기 때문에, 이에 근접한 부근을 가진함으로써 모드를 확실하게 모사할 수 있었다.

Table 5는 가진하중(0.25N, 0.5N, 0.75N)에 따른 시험과 접촉모델과의 비교를 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 랜덤 가진시 보다 전반적으로 고유진동수가 약간씩 낮아지며, 기본진동수에서의 MAC값 또한 각각 0.78, 0.617, 0.596로 낮아진다. 이러한 결과는 가진 하중이 일부 구간에서의 모드를 왜곡시키기 때문으로 판단된다. 실제로 여기서 나타내지는 않았지만 가진 하중이 커지면 가진 구간인 Span #5에서의 진동진폭이 커지게 되는데, 이로 인해 해석과 시험 사이의 모드형상의 상호관계를 나타내는 MAC값이 낮아지게 된다. 결과적으로 가진점을 옮김으로 해서 기본진동수의 모드를 정확하게 모사할 수 있었으며, 시험과 접촉을 고려한 해석모델의 고유진동수도 최대 5% 이내에서 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 5 Natural frequencies and MAC values of the fuel rod supported by ND SGs with various excitation forces (Span #5, contact model)

Excitation Force(N)	Mode	Frequencies (Hz)		Error*	MAC Value
		Test	FEA		
0.25	1	42.88	43.64	-1.78	0.780
	2	54.98	55.51	-0.97	0.635
	3	56.12	57.24	-1.99	0.927
	4	58.64	59.68	-1.77	0.945
	5	60.65	62.29	-2.71	0.734
	6	62.13	64.55	-3.89	0.674
	7	64.00	66.01	-3.10	0.956
0.5	1	42.92	43.64	-1.67	0.617
	2	54.92	55.51	-1.07	0.837
	3	56.32	57.24	-1.64	0.931
	4	59.04	59.68	-1.07	0.695
	5	60.85	62.29	-2.36	0.408
	6	62.23	64.55	-3.71	0.745
	7	63.95	66.01	-3.22	0.972
0.75	1	42.55	43.64	-2.58	0.596
	2	54.78	55.51	-1.34	0.915
	3	55.37	57.24	-3.38	0.760
	4	58.48	59.68	-2.04	0.742
	5	59.36	62.29	-4.94	0.433
	6	62.19	64.55	-3.78	0.778
	7	62.88	66.01	-4.98	0.788

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

이상의 고유진동수, 모드형상, MAC값 등의 결과로부터, 보-스프링 요소를 이용한 단순모델보다 접촉을 고려한 해석모델이 진동거동을 정확히 모사함을 확인하였다. 또한 접촉해석을 연계한 개선된 진동해석 모델은 지지격자의 개수가 증감되거나, 감소 또는 격자들 사이의 간격이 조정되는 등의 설계변경이 되었을 때, 시험을 수행하지 않고도 좀더 정확히 연료봉의 동적 거동을 예측하는데 이용될 수 있을 것이다.

## 5. 결론

(1) 8개의 새지중판 지지격자로 연속 지지된 3,847 mm 모의 연료봉의 기본진동수는 약 43 Hz를 보였고, 40~70 Hz 범위에 7개의 고유진동수가 존재하였다.

(2) 보-스프링 요소를 사용한 단순모델과 접촉을 연계한 해석모델은 3차와 4차 모드에서 차이가 있었으며, 접촉모델은 단순모델에서 나타났던 일부 구간에서의 2차 굽힘모드가 나타나지 않았다.

(3) 시험에서 가진점의 위치는 기본진동수의 모드형상에 크게 영향을 준다. 즉, 중앙구간(Span #4)을 가진하는 경우, 기본진동수의 모드를 거의 모사하지 못하였으나 Span #5를 가진함으로써 모드를 정확히 모사하여 두 결과의 신뢰성을 크게 높일 수 있었다.

(4) 시험하중의 증가에 따라서 고유진동수는 약간씩 감소하는 경향을 보였고, 기본진동수에서의 MAC값은 낮아졌는데, 이것은 일부 구간에서의 진동진폭이 다르기 때문이며, 특히 가진점에서의 진폭이 커지는 등 가진력이 모드를 왜곡시키기 때문에 모드들 간의 신뢰성을 떨어뜨리고 있다.

(5) 접촉해석을 연계한 개선된 진동해석 모델은 지지격자 개수의 증가나 감소, 격자들 사이의 간격이 조정되는 등의 설계가 변경되었을 때, 시험을 수행하지 않고도 좀더 정확히 연료봉의 동적 거동을 예측하는데 이용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능지지격자구조기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

(1) 송기남 외 11인, 2003, 고성능 지지격자 구조기술 개발, KAERI/RR-2308/2002, 한국원자력연구소.

(2) Kang, H.S., Song, K.N., Kim, H.K. and Yoon, K.H., 2003, "Axial-Flow-Induced Vibration for a Rod Supported by Translational Springs at Both Ends", Nuclear Engineering and Design, Vol.220, pp.83~90.

(3) Chen, S.S. and Wambgsann, W., 1972, "Parallel-Flow-Induced Vibration of Fuel Rods", Nuclear Engineering and Design, Vol.18, pp.253~278.

(4) Paidoussis, M.P., 1981, "Fluidelastic Vibration of Cylinder Arrays in Axial and Cross Flow-State of the Art", Journal of Sound and Vibration, Vol.76, pp.329~360.

(5) Stoller Report, 1995, "A Study of Grid to Rod Fretting Wear in PWR Fuel Assemblies", SMSC, Vol.1, April.

(6) 윤경호, 송기남, 강홍석, 김형규, 2001, 지지격자 스프링/담플의 기계적 특성시험 및 유한요소 해석, KAERI/TR-1763/2001, 한국원자력연구소.

(7) 송기남, 윤경호, 강홍석, 김형규, 2002, "경수로용 신형 핵연료 지지격자의 기계/구조적 특성 평가", 대한기계학회 2002년도 춘계학술대회는문집, KSME02S004, pp.19~24.

(8) 송기남, 허성필, 윤경호, 강홍석, 김형규, 최명환, 2002, "경수로용 신형 지지격자의 성능평가", 기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄(대한기계학회 편), pp.131~136.

(9) Kim, H.K., Kang, H.S., Yoon, K.H. and Song, K.N., 2001, "Experimental Investigation on the Parameters Affecting Fuel Fretting Wear", 16th Int. Conference on Structural Mechanics In Reactor Technology (SMiRT-16), Paper #1548.

(10) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2000, "지지격자 스프링으로 다점지지된 환형 핵연료봉의 고유진동해석", 한국소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회는문집, pp.639~646.

(11) 이상철 외 7인, 2000, 연료봉 지지거동 및 진동해석 모델검증시험, KAERI/CM-328/99, 한국항공우주연구원.

(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 the Korean Nuclear Society, Vol.33, No.1, pp.73~82.

(13) 최명환, 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2003, "지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성", 대한기계학회논문집A, 제27권, 제3호, pp.424~431.

(14) 최명환, 강홍석, 송기남, 윤경호, 김형규, 2002, "접촉해석이 연계된 스프링 지지보의 진동해석", 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회는문집, pp.1216~1221.

(15) Hibbit, H.D., Karlsson, G.I. and Sorensen, E.P., 2001, ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.3, HKS Inc., RI, USA.

(16) SDRC, 2002, I-DEAS Master Series 9.0, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.