

측면 절개된 판형 스프링으로 지지된 경수로 연료봉 진동의 실험적 고찰

An Experimental Study on the Vibration of the PWR Fuel Rod Supported by the Side-slotted Plate Springs

최명환[†] · 강홍석* · 윤경호* · 송기남*

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

(2003년 7월 9일 접수 : 2003년 9월 30일 심사완료)

Key Words : Vibration(진동), New Doublet(새이중판), Fuel Rod(연료봉), Spacer Grid(지지격자), PWR(경수로)

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 results of the modal testing are compared with those of the FE analysis. The natural frequencies as well as the mode shapes obtained by the experiment have a greater similarity to the results by the contact model than 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 연료봉(fuel rod)을 지지하고, 지진과 같은 외부 하중으로부터 연료봉을 보호하며 원자로 긴급냉각이 가능하도록 충분한 구조강도를 갖추어야 하는 중요한 구조물이다. 핵분열하는 UO₂

소결체(pellet)가 장입된 연료봉에는 원자로내 가압된 냉각수의 유동으로 인하여 유체유발진동(flow induced vibration : FIV) 현상이 발생하게 된다.^(1~2) 이러한 냉각재 유동에 의해 유발된 진동은 연료봉과 이것을 지지하는 지지격자 스프링 사이에 상대운동을 일으키고, 이러한 상대운동에 의하여 연료봉 표면에 프레팅 마멸이 발생하며, 심한 마멸은 연료봉 피복관을 손상시켜 수명을 단축시키기도 한다. 따라서 핵연료의 한계수명(3~5년)까지 기계적인 원인에 의해 연료봉이 손상되지 않도록 하기 위해서는 지지격자 개발단계에서부터 연료봉, 지지격자 그리고 이들 간의 거동에 대한 고려가 필요하고, 그 중 하나가 연료봉의 진동거동이다.

[†] 책임저자, 정희원, 한국원자력연구소
E-mail : cmh2002@orgio.net
Tel : (042) 868-8531, Fax : (042) 863-6521
* 한국원자력연구소

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.^(3~5) 또한 노내에서의 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동거동을 예측하기 위하여 실제모형을 근사화한 이론적 모델의 개발 및 시험을 통한 검증에 대한 연구가 수행되었다.^(6~8) 최근에는 그동안 개발된 많은 지지격자들 중에서 기계/구조적 성능이 우수한 것으로 평가된 최적화 H형 (optimized H type: OHT)과 측면 절개형 단위셀로 구성된 새이중판 (new doublet : ND) 지지격자를 주 후보로 선정하여 집중적인 연구가 수행되고 있다.^(9, 10) 이전의 연구에서는 두 주후보 격자체로 지지된 연료봉의 공기중, 수중 진동특성 및 유한요소 해석모델의 개발에 대하여 언급하였다. 특히 측면 절개된 판형의 새이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 진동에 대한 연구에서는 보(beam)와 스프링(spring) 요소를 이용한 유한요소 단순모델이 진동시험 결과와 비교할 때 진동모드는 잘 일치하였으나, 고유진동수는 비교적 큰 차이가 있었다. 따라서 이러한 차이를 줄이기 위하여 지지격자와 연료봉 사이의 면접촉(area contact)을 고려한 해석모델을 개발하였으며, 5개의 새이중판 지지격자로 지지된 2,189 mm 연료봉에 대하여 좋은 결과를 보였었다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 개발단계에서의 시험 크기가 아닌 실제 상용로에 적용되는 3,847 mm 크기의 경수로 연료봉을 모델로 하였으며, 실험적 방법을 통하여 8개의 새이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 진동특성을 파악하는데 근본적인 목적이 있다. 또한 이들 시험결과를 비교/검증을 위하여 접촉해석을 고려하여 해석할 수 있도록 개발된 유한요소 해석모델을 수정, 적용하였다. 수치적 방법에 의한 진동해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾로 수행하였으며, 유한요소해석 결과와 진동시험 결과의 비교/분석은 I-DEAS⁽¹²⁾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 고유모드의 파악에 미치는 영향을 평가하였다.

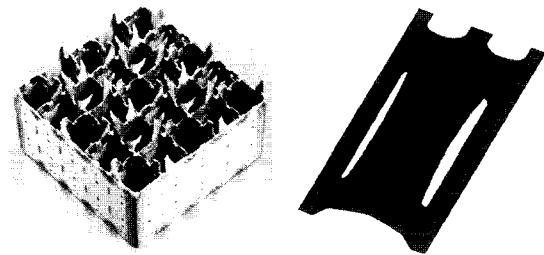
2. 진동시험

본 연구에서 고려한 새이중판 지지격자의 5×5형 부분 격자체 형상과 단위셀의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 새이중판 지지격자는 기존의 이중판 노즐형 지지격자(국내에서 개발된 핵연료 부품 중에서 최초로 미국특허 획득)에 기초하여 개발된 것으로 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 연료봉으로 실제 핵연료봉과 다른 점은 연료봉 내부의 소결체를 실제 UO₂(10.4 g/cm³) 보다 약간 무거운 납봉(11.4 g/cm³)으로 대체하여 제작한 것뿐이고, 다른 모든 부품은 실제 핵연료봉과 동일하다.

Fig. 2는 시험에 사용된 연료봉이 지지격자에 의해서 지지된 상태에서의 전체적인 형상을 나타내었는데, 처음 여섯 개 구간(Span #1~#6)은 522 mm, 마지막 한 개 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 연



(a) 5×5 type partial grid (b) Unit cell
Fig. 1 Shape of New Doublet spacer grids

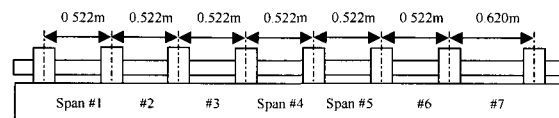


Fig. 2 Schematic view of the test specimen

료봉의 중앙구간(Span #4)의 좌측으로부터 3/4 지점에 부착하여 가진하였다. 또한 가진점 위치의 영향을 고찰하고, 기본진동수의 모드를 좀더 정확히 얻기 위하여 가진점의 위치를 Span #5로 옮겨 측정하기도 하였다. 가속도계는 가진구간과 7번째 구간의 1/4과 3/4 지점에 각각 1개, 나머지 구간의 중앙에 1개의 가속도계를 부착하여 총 9개를 사용하였다. 마지막으로 변위는 최대변위가 예상되는 가진기가 설치된 구간의 중앙에 비접촉식 갭센서(gap sensor) 1개를 사용하여 측정하였다. 진동시험(modal testing)은 가진기를 이용한 sine sweep을 통하여 수행하였고, 센서로부터의 신호는 B&K Nexus 앰프를 통하여 HP7500 VXI Front End에 연결되며, 이들 신호는 HP×2000 W/S에 설치되어 있는 I-DEAS의 TDAS에서 데이터 획득 및 후처리를 하였다.

3. 유한요소해석

새이중관 지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 유한요소모델에 있어서 보와 스프링 요소를 이용한 단순모델은 기본진동수에 있어서 실험결과와 30% 이상의 큰 오차를 보였다.⁽⁹⁾ 이것은 실제로 새이중관 지지격자가 연료봉과 초기 설치 상태에 0.15 mm의 접촉거리를 갖도록 설계된 면접촉을 하는 구조물인데 이를 단순한 보와 스프링으로 보았기 때문이라 판단되었다. 따라서 저자들은 새이중관 지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 위하여 I-DEAS와 ABAQUS를 이용하여 3차원 기하형상을 모델화하고,

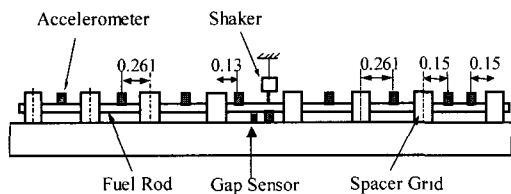


Fig. 3 Measurement positions (Unit: mm)

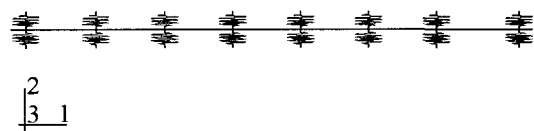


Fig. 4 Beam-spring model of the fuel rod 3.847 mm

양단 스프링으로 지지된 단일구간의 570 mm 연료봉과 5개의 지지격자로 지지된 2,189 mm 연료봉에 접촉해석을 고려한 모달해석을 수행하여 좋은 결과를 얻은 바 있다.⁽¹⁰⁾ 본 논문에서는 접촉해석 모델을 8개의 지지격자로 지지된 3,847 mm 연료봉의 진동해석에 적합하도록 수정, 적용하였고, 자세한 내용은 참고 문헌⁽¹⁰⁾에서 기술되었으며, 여기서는 본 모델과 관련한 유한요소모델에 관하여 간략히 언급하였다.

Fig. 4는 보(beam)와 스프링(spring) 요소를 이용한 단순모델을 나타내었다. 모델에서 지지격자는 2D 스프링 요소를 사용하였는데, 이때 해석에서 스프링 상수는 특성 시험을 통하여 얻은 값(114 N/mm)을 이용하였다.⁽⁹⁾ 접촉을 고려한 모델은 4절점 쉘요소(S4R)를 이용하여 연료봉과 스프링이 접촉하는 부분의 형상을 상세히 모델하였다. 이때 연료봉이 지지격자체에 삽입되면 스프링은 한쪽 접촉면에 대하여 약 0.15 mm의 접촉거리를 갖도록 설계되었기 때문에 이 접촉거리를 초기 간섭량으로 하여 접촉해석을 수행하고, 후에 모달해석을 수행하여 진동특성을 얻었다.

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) 변화에 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, 가진 하중이 커짐에 따라 변위는 증가하고, 기본진동수나 최대변위가 발생하는 점의 진동수는 거

Table 1 Displacements of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids with various excitation forces

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

의 변화가 없었다. 이것은 연료봉의 비선형 거동이 크게 나타나지 않았기 때문이며, 가진 하중이 더 커지면 비선형성은 뚜렷하게 나타날 것으로 판단된다. 실제로 5개 지지격자로 지지된 2,189 mm 연료봉에서는 가진 하중의 증가에 따라 변위는 증가하고, 고유진동수는 낮아져 연료봉의 비선형 거동이 나타남을 확인할 수 있었다.

4.2 고유진동수 및 모드형상

새이중판 지지격자로 지지된 길이 3,847 mm의 모의 연료봉의 진동특성을 얻기 위하여, 접촉해석을 연계하여 개발된 유한요소모델을 적용한 결과와 시험결과를 비교/고찰하였다. 결과들은 연료봉의 고유진동수, 모드형상, 시험과 해석결과에서 모드의 상호관계를 나타내는 모달확신기준(MAC) 값으로 나타내었고, 또한 결과들은 가진 위치 따른 변화로서 기술하였다.

(1) Span #4 가진시

Table 2는 중앙구간(Span #4)을 랜덤 가진하는 경우, 시험결과 및 보-스프링 요소, 접촉모델을 사용한 경우의 유한요소해석 결과를 함께 나타내었다. 기본진동수에 있어서 보-스프링 모델은 이전의 연구결과와 마찬가지로 33.6%의 오차를 보였으나, 접촉모델에서는 0.6%의 오차로 시험결과와 잘 일치하였다. 고차모드에서도 단순모델은 큰 차이를 보여 새이중판 지지격자의 경우 보-스프링 요소를 사용한 모델을 이용하는 것은 다소 부정확하다는 것을 알 수 있다. 그러나 접촉모델을 적용한 결과는 최대 1.58%의 차이를 보이며 접촉모델이 시험결과를 잘 모사하고 있다.

Table 2 Natural frequencies and MAC values of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids 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

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

이렇게 보-스프링 모델과 접촉모델의 결과에 차이가 있는 것은 연료봉과 격자 스프링 사이의 접촉점에서의 거동차이로 인하여 발생하는 것으로 판단된다. 즉 보-스프링 모델은 연료봉과 격자 스프링의 접촉점을 점지지(point support)로 생각할 수 있으며, 이는 실제 현상보다 접촉점에서 연료봉의 길이방향 기울기를 크게 할 수 있다. 하지만 접촉모델은 연료봉과 격자 스프링이 면접촉을 하게 되며, 격자 스프링이 연료봉의 길이방향 기울기를 작게 제한하게 된다. 결과적으로 점지지 되는 보-스프링 모델은 고유진동수 측면에서 실제 연료봉의 거동을 과소 평가하게 되며, 면접촉의 고려는 실제 거동을 근접하게 모사하여 시험결과와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 랜덤 하중하에서 시험과 보-스프링 요소를 이용한 유한요소 모드형상의 비교인데, 실선은 해석결과, 원은 시험결과를 나타낸다. 기본진동수의 모드는 길이가 620 mm인 Span #7에서의 1차 굽힘모드가 지배적임을 유한요소해석으로부터 확인할 수 있다. 그러나 시험에서는 가진점에서의 진폭이 크고, 다

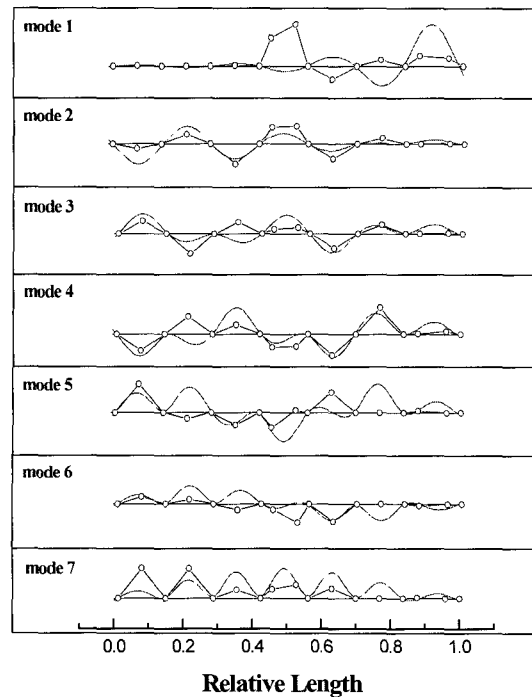


Fig. 5 Mode shape comparison of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids between the test and the beam-spring FE analysis (Span #4, random)

른 구간에서는 변위의 방향이나 크기가 다르게 나타나고 있다. 이로 인하여 Table 2에서 알 수 있듯이 기본진동수에서의 MAC값이 zero에 가까운 값을 갖는다. 일반적으로 MAC값은 시험과 해석 모드형상의 적교성을 이용하여 신뢰성을 평가하는데 이용되는데, 1.0(혹은 100%)에 근접할 수록 동일한 모드임을 나타낸다. Fig. 6은 시험과 접촉모델 사이의 MAC 그래프를 나타낸 것으로 이 경우에도 기본진동수에서의 두 모드간의 신뢰성이 떨어지고 있다. Fig. 7은 접촉 해석을 연계한 진동해석 결과의 모드형상을 보이고 있다. 전체적으로 보-스프링 모델의 모드형상은 비슷하지만, 3차와 4차 모드에 약간 차이가 있으며, 또한 보-스프링 모델에서 나타나는 Span #4(mode 6)와 Span #5(mode 5)에서의 2차 급힘 모드가 접촉을 고려한 모델에서는 나타나지 않아 시험결과와 더 유사한 결과를 보였다.

이상의 Span #4를 가진하는 경우, 접촉을 고려한 유한요소모델을 통하여 좀 더 정확한 고유진동수를 구할 수 있었다. 그러나 아직도 기본진동수의 모드형상에 있어서는 차이가 많음을 알 수 있다. 그 원인은 보-스프링 모델과 접촉모델을 이용한 기본 진동모드는 동일한 결과를 보였기 때문에 유한요소 해석상의 문제가 아니라 시험조건에서 가진 위치의 문제로 판단되었다. 또한 유한요소해석 결과로부터 연료봉의 기본 진동모드는 다른 구간에 비하여 길이가 긴 마지막 구간(Span #7)의 1차 급힘모드임을 확인할 수 있다. 그러나 Span #4를 가진하는 경우, Fig. 5에서 보는

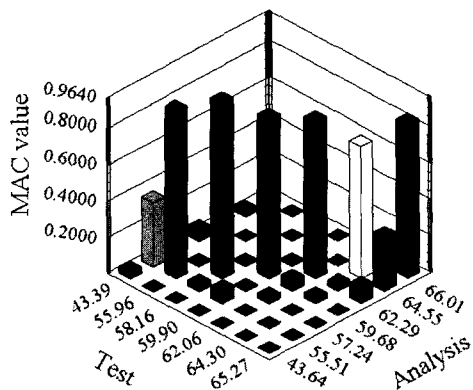


Fig. 6 MAC values between the test and the contact FE analysis of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids under the random excitation at Span #4

바와 같이 가진 구간의 모드가 상대적으로 크게 왜곡되어 모드간의 신뢰성이 떨어지고 있는 것이다. 따라서 이를 해결하기 위한 방안으로 가진 위치를 달리하였으며, 기본진동수의 모드가 크게 나타나는 Span #7에 가까운 구간으로 가진점을 옮김으로서 기본진동수에서의 모드를 찾을 수 있었다.

(2) Span #5 가진시

Table 3은 Span #5를 랜덤 가진하는 경우의 시험과 단순모델, 시험과 접촉모델의 비교결과를 나타내었

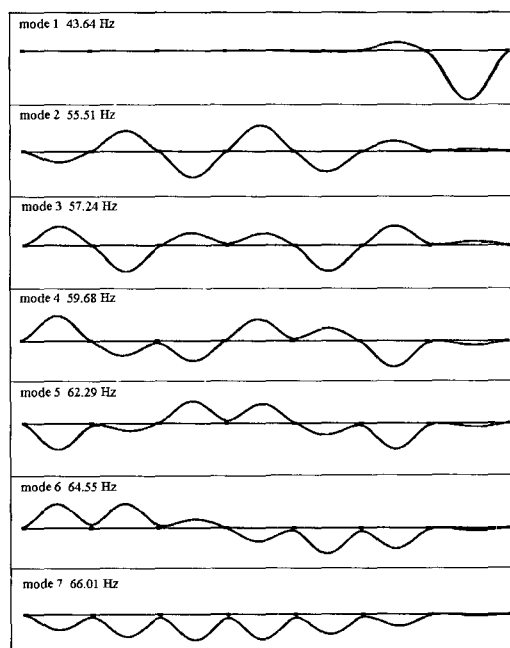


Fig. 7 Mode shapes of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids using the contact FE model

Table 3 Natural frequencies and MAC values of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids 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 = $\frac{-(\text{Test} - \text{FEA})}{\text{Test}} \times 100(\%)$

다. 시험결과는 접촉모델 결과와 더 잘 일치하고, 더 신뢰성 있는 MAC값을 보이는 등의 전체적인 경향은 Span #4를 가진하는 경우와 잘 일치한다. 그러나 기본진동수의 모드에는 분명한 차이가 있는데, Span #4를 가진하는 경우 MAC값은 0.05로 두 모드는 서로 관계가 전혀 없는 것처럼 보였었다. 그러나 Span #5를 가진하는 경우 MAC값은 0.843을 보여 기본진동수의 모드를 정확하게 구현하고 있음을 Fig. 8의

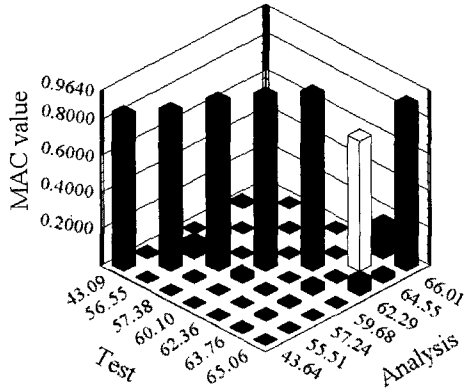


Fig. 8 MAC values between the test and the contact FE analysis of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids under the random excitation at Span #5

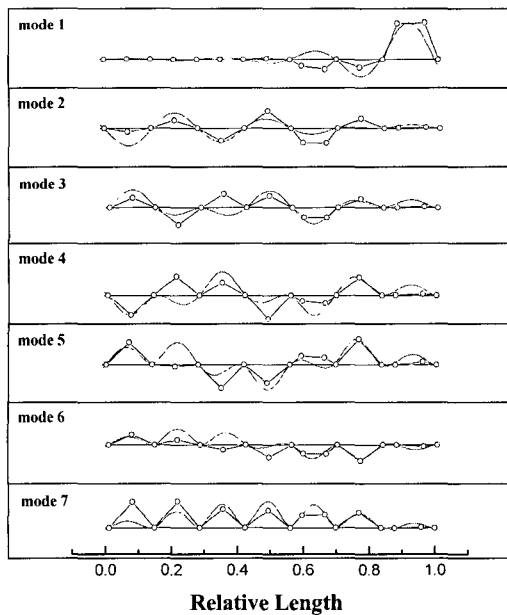


Fig. 9 Mode shape comparison of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids between the test and the beam-spring FE analysis (Span #5, random)

MAC 그래프를 통하여 확인할 수 있다.

이러한 결과는 여러 개의 스프링으로 지지된 연료봉의 경우, 가진 위치에 따라 모드형상을 정확하게 모사하지 못하는 경우가 발생할 수 있음을 보이는 것이다. 따라서 이런 경우에는 해석과 시험결과의 상호 비교를 통하여 오차의 원인을 분석하고 대처함으로써 정확한 결과를 도출하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 본 시험의 경우에는 연료봉의 기본진동수가 비교적 길이가 긴 Span #7에서의 굽힘모드가 지배적이었기 때문에 이 구간에 근접한 부근을 가진함으로써 모드를 정확하게 모의할 수 있었다.

Fig. 9는 Span #5를 랜덤 가진하는 경우 보-스프링 요소를 사용한 해석결과와 시험결과의 비교를 나타내었다. Span #4를 가진하는 경우에 보였던 기본진동 모드의 불일치가 많이 개선되어 시험모드와 해석모드의 결과가 서로 잘 일치하고 있다.

Table 4는 가진하중(0.25 N, 0.5 N, 0.75 N)에 따른 시험과 접촉모델 결과와의 비교를 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 랜덤 가진시 보다 전반적으로 고유진

Table 4 Natural frequencies and MAC values of the fuel rod supported by New Doublet spacer grids 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

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

동수가 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 진동 진폭이 커지게 되는데, 이로 인해 해석과 시험 사이의 모드형상의 상호관계를 나타내는 MAC값이 낮아지는 결과를 보였다.

5. 결 론

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

(2) 원자로 정상운전 상태에서 예상되는 0.2 mm 정도의 최대 변위를 보이는 가진하중은 0.7~0.8 N이고, 2차 모드인 54 Hz 근처에서 발생하였다.

(3) 연료봉과 격자스프링 사이의 면접촉을 고려한 해석모델은 점지지로 생각할 수 있는 보-스프링 요소를 사용한 모델보다 실제 연료봉의 거동을 좀더 근접하게 모사 하였으며, 이는 고유진동수와 일부 구간에서의 2차 굽힘모드가 접촉모델에서는 나타나지 않는다는 사실로부터 확인하였다.

(4) 시험에서 가진 위치의 영향으로서 중앙구간 (Span #4)을 가진하는 경우, 기본진동수의 모드를 찾을 수 없었다. 그러나 Span #5를 가진함으로써 기본진동모드를 정확히 찾을 수 있었고, 해석과 시험 두 결과의 모드의 신뢰성을 크게 높일 수 있었다.

(5) 가진하중의 증가에 따라 연료봉의 변위는 증가하고, 고유진동수는 같거나 약간 감소하였으며, 가진력이 가진 구간에서의 모드를 왜곡시켜 모드들 간의 신뢰성을 낮게 하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능지지격자개발 과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) 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.

(2) Chen, S. S. and Wambsganss, W., 1972, "Parallel-flow-induced Vibration of Fuel Rods," Nuclear Engineering and Design, Vol. 18, pp. 253~278.

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

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

(5) 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.

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

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

(8) 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.

(9) 최명환, 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2003, "지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성." 대한기계학회논문집A, 제 27 권, 제 3 호, pp. 424~431.

(10) 최명환, 강홍석, 윤경호, 송기남, 2003, "접촉해석이 연계된 환형 스프링 지지보의 진동해석," 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 5 호, pp. 384~392.

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

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