

## 접촉해석이 연계된 판형 스프링 지지보의 진동해석

### Vibration Analysis of Beam Supported by Plate Type Springs Considering a Contact

최명환<sup>†</sup> · 강홍석\* · 윤경호\* · 송기남\*

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

(2003년 2월 18일 접수 : 2003년 4월 7일 심사완료)

**Key Words** : Vibration(진동), Contact Distance(접촉거리), Doublet(이중판), Fuel Rod(연료봉), Spacer Grid(지지격자)

#### ABSTRACT

The fuel rods in the pressurized water reactor are continuously supported by a spring system called a spacer grid which is one of the main structural components for the fuel rod cluster(fuel assembly). The fuel rods vibrate within the reactor due to coolant flow. Since the vibration, which is called flow-induced vibration(FIV), can wear away the surface of the fuel rod, it is important to understand its vibration characteristics. In this paper, the vibration analyses and the tests for the dummy rods supported by New Doublet(ND) spacer grids are described. A new FE model which reflects the contact area between the rod and ND spacer grid spring is developed to replace the previous one by which a good agreement could not be obtained with the vibration test. The natural frequency and mode shape calculated by both the previous FE model and the new one are compared with those of experiment for a single-spanned rod supported by two ND spacer grids. The results of the new model showed good agreement with the experiment compared with those of previous model. In addition, the new FE model is applied to the vibration analysis for the dummy rod of 2,189 mm tall continuously supported by five ND spacer grids. It is also obtained that the analysis results of the new FE model well agreed to experiment ones as the single-spanned rod.

#### 1. 서 론

경수로용 핵연료집합체에서 연료봉(fuel rod)은 원통형 관(tube) 내부에 UO<sub>2</sub> 소결체(pellet)를 포함하고 있으며, 원자로내의 가압된 냉각수의 유동은 연료봉의 유체유발진동(flow induced vibration: FIV)을 발생시킨다.<sup>(1)</sup> 원자로 내에서 유체의 거동에 노출되어 있는 원자력 구조물의 건전성 확보는 원자로의 안전한 운전과 관련된 중요한 문제이며,<sup>(2, 3)</sup> 핵연료집합체에서 지지격자(spacer grid)는 연료봉을 지지하고, 보

호하는 역할을 하기 때문에 너무 강하거나 약해서도 안되며 적당한 강성을 갖도록 설계되어야 한다. 일반적으로 원자로 내에는 0~50 Hz 사이의 진동원이 존재하는 것으로 알려져 있으며,<sup>(4)</sup> 이러한 진동원으로 인한 진동은 연료봉과 이를 지지하는 격자 스프링의 지지부 사이에서의 상대운동으로 인하여 연료봉의 프레팅 마멸손상을 일으키게 되어 연료봉의 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 핵연료의 한계수명까지 기계적인 원인에 의해 연료봉이 손상되지 않도록 하기 위해서는 지지격자 개발단계에서부터 연료봉과 지지격자 간의 거동에 대한 고려가 필요하다.

지지격자는 원자로 운전 환경하에서 안전하게 설계되었는지를 검증하는 절차가 필요하고, 이를 위하여 시험 및 해석적인 방법에 의한 지지격자체에 대한 충

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 한국원자력연구소

E-mail : cmh2002@orgio.net

Tel : (042) 868-2298, Fax : (042) 863-0565

\* 한국원자력연구소

격 및 좌굴, 연료봉 지지부위에 대한 프레팅 마멸 시험 그리고 지지성능 등과 같은 기본 특성시험이 수행되어 왔다.<sup>(5-9)</sup> 또한 핵연료봉의 진동특성은 지지격자 스프링의 설계에 따라서 달라질 수 있으며, 이들 진동특성을 통하여 지지격자 스프링들의 비교 우위도 평가할 수 있다.<sup>(10, 11)</sup>

지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 방법으로는 모달시험(modal testing)에 의한 평가가 좋으나 많은 설계변경을 요하는 개발단계에서는 해석적 방법에 의한 진동특성 규명이 더 바람직한 것으로 판단된다. 해석적 방법은 실제모델을 근사화한 이론적 모델을 통하여 수행하는 것이 일반적이는데, 이때 신뢰성 있는 이론 모델의 개발 및 검증이 필수적이다. 한국원자력연구소에서는 그동안 개발되어온 지지격자로 지지된 연료봉의 진동특성을 파악하고, 이를 모사하기 위한 이론적 모델의 검증절차에 대한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(10-15)</sup> 또한 최근 수행된 최적화 H형(Optimized H type)과 새이중판(New Doublet) 지지격자로 지지된 연료봉의 시험결과<sup>(12)</sup>에서는 새이중판으로 지지된 연료봉이 더 높은 고유진동 특성을 보였으나, 해석결과와의 비교에서는 시험결과에 비하여 상당히 낮게 평가되는 경향을 보였다. 그 동안의 유한요소해석에서 지지격자의 스프링(spring)과 딴플(dimple)은 등가의 강성을 갖는 단순한 스프링 요소로 모델링되었다. 그러나 새이중판 지지격자는 연료봉을 지지할 때 연료봉의 반경방향으로 약 0.15 mm의 접촉거리(contact distance)를 갖고 면접촉을 하도록 설계되었기 때문에 이를 단순한 스프링으로 모델한 것에서 시험과 해석의 차가 발생한 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 그동안 개발되어온 여러 지지격자들 중에서 기계적, 구조적 성능이 우수한 것으로 평가된 새이중판 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동특성 및 유한요소 해석모델의 개발에 대하여 기술하였다. 초기 모델의 검증을 위하여 양단이 스프링으로 지지된 단일 스펠(single span) 연료봉의 접촉해석을 연계한 해석결과와 모달시험 결과의 비교를 통하여 유한요소 해석모델의 신뢰성을 검증하였다. 또한 이전의 연구에서 시험과 해석결과에 약 30%의 차이를 보였던 5개의 지지격자체로 연속지지된 연료봉의 진동해석에 접촉모델을 적용하였다. 접촉해석 및 진동해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(16)</sup>를 사용하였으며, 기하학적 형상 모델링, 절점 및 요소의

생성에 I-DEAS<sup>(17)</sup>를 사용하였다. 또한 진동시험의 수행 및 해석과 시험 결과의 비교/분석은 I-DEAS의 시험모듈인 TDAS 프로그램을 사용하였다.

## 2. 모달시험

### 2.1 시험시편

Fig. 1은 지지격자에 의해서 연속적으로 지지된 경수로용 핵연료집합체의 형상을 나타내었고, Fig. 2는 새이중판 지지격자의 5×5형 부분격자체 형상과 연료봉과 접하는 면의 판형 단위격자를 나타내었다. 새이중판 지지격자는 기존의 이중판 노출형 지지격자에

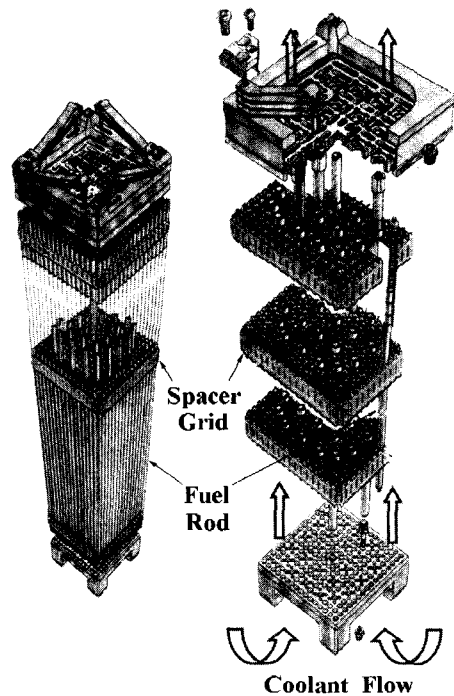
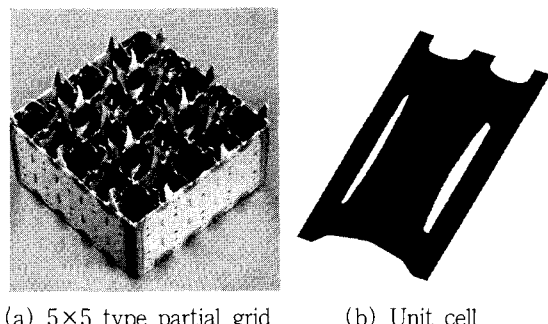


Fig. 1 Fuel rods in PWR fuel assembly



(a) 5×5 type partial grid (b) Unit cell

Fig. 2 Shape of New Doublet spacer grids

기초하여 개발된 것으로서 연료봉을 지지하는 스프링 강성을 적절하게 완화시킨 것이다. 스프링 강성의 완화책으로서 단위격자에서 보인 것처럼 스프링 양편에 슬롯(slot)을 두어, 스프링 강성을 설계자 의도대로 완화시키고 접촉면에서의 마멸특성도 크게 향상시킨 것이다.

본 연구에서는 진동해석 유한요소모델의 개발 및 검증에 위해 Table 1과 같이 두 경우의 연료봉을 사용하였다. Case1은 새이중관 스프링으로 양단 지지된 길이 570 mm 연료봉의 단일스팬 모델이고, Case2는 참고문헌<sup>(12, 15)</sup>에서 언급된 길이 2,189 mm의 5개의 지지격자체로 연료봉이 연속지지된 모델이다. 진동시험에 사용된 모의 연료봉이 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 밀도를 갖는 납봉으로 대체하여 제작한 것 뿐이고, 소결체를 제외한 모든 부품은 실제 핵연료봉의 부품을 사용하였다.

### 2.2 시험

유한요소 모델 검증 및 비교를 위한 Case1 모델의 진동특성을 얻기 위하여 충격가진법(impact excitation)을 이용한 모달시험을 수행하였다. 시험에 사용한 센서는 충격해머(impulse hammer : B&K, Type 8202)와 모드형상을 얻기 위하여 7개의 가속계(accelerometer : RION, PV-90B)를 사용하였으며, 센서로 부터의 신호는 B&K charge and conditioning amplifier를 통하여 데이터획득 장비(VXI HP7500 Series B)에 연결된다. 마지막으로 이들 신호는 HP × 2000 W/S에 설치되어 있는 I-DEAS의 TDAS에서 데이터 획득 및 후처리를 하였고, 이들 진동시험의 개

Table 1 Specification of the test specimen

Case	Case1	Case2
Length (mm)	570	2,189
The number of spacer grids	2	5
Rod mass (kg)	0.415	1.484
Density (kg/m <sup>3</sup> ) (stack region)	43,368	43,368
No. of element/node (simple model)	68/69	252/253
No. of element/node (contact model)	6,232/7,032	13,427/15,398
Material	Zircaloy-4	

략도를 Fig. 3에 나타내었다. Case2의 실험에 대한 내용은 참고문헌<sup>(12, 15)</sup>에 상세히 언급되었으며, 본 논문에서는 결과만을 언급한다.

### 3. 유한요소해석

기존의 Case2 모델에 대한 스프링 요소를 사용한 단순모델 결과와 시험결과 사이의 비교적 큰 차이는 실제로 새이중관 지지격자가 연료봉과 면접촉을 하는 구조물인데 이를 단순한 스프링 요소로서 모델하였기 때문으로 판단된다. 따라서 해석모델의 개선은 면접촉 현상을 고려하는 아이디어에서 시작하였으며, 이를 위하여 I-DEAS와 ABAQUS를 이용한 3차원 기하형상을 모델하고, 접촉해석을 고려한 모달해석이 수행될 수 있도록 유한요소 모델을 개발하였다. 연료봉과 지지격자는 Zircaloy-4 재질로 이루어졌고, 해석에 사용된 기본 물성은 탄성계수 108.3 GPa, 밀도 6,600 kg/m<sup>3</sup>, 프와송비 0.294이 사용되었다.

#### 3.1 단순모델(simple model)

보와 스프링 요소를 이용한 단순모델에서 연료봉은 2절점 선형 요소(B21)를 이용하여 모델링하였고, 지

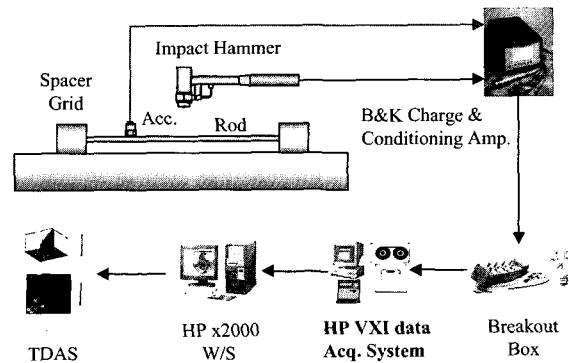


Fig. 3 Schematic view of the modal testing

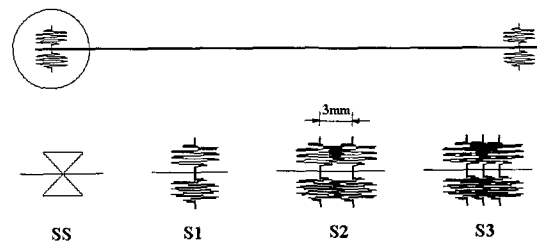
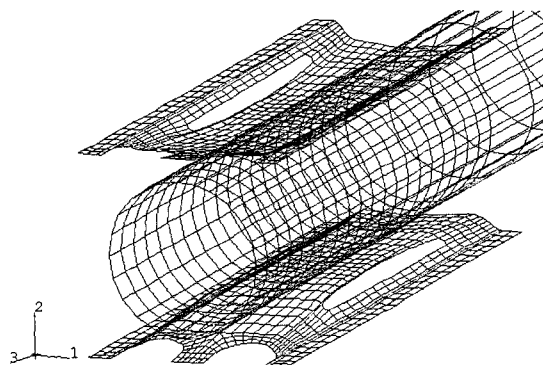


Fig. 4 Simple spring model for Case1

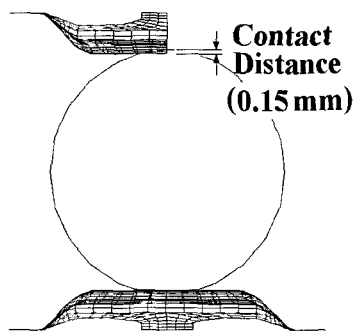
지격자 스프링은 2D 스프링 요소(SPRINGA)를 사용하였다. Fig. 4는 양단 스프링 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 스프링부의 단순모델에 대한 개념도로서, SS는 단순지지, S1은 접촉부를 하나의 단순 스프링으로 고려한 경우이고, S2와 S3는 각각 2개와 3개의 스프링으로 모델링한 것이다. 이때 해석에서 스프링의 강성은 실험을 통하여 얻은 값, 114 N/mm을 이용하였고, <sup>(18)</sup> S2나 S3의 경우처럼  $n$ 개의 병렬 연결된 스프링 모델의 스프링 상수는 다음의 간단식을 사용하였다.

$$k_{eff} = \sum_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

또한 모델에서 연료봉 내부의 납봉은 연료봉의 강성에 미치는 영향은 매우 작고, 질량은 진동특성에 크게 영향을 줄 것으로 판단되어, 연료봉을 모델하고 납봉의 질량만큼 재료의 밀도가 증가한 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때 사용한 연료봉의 밀도와 모델에 대한 절점 및 요소의 수는 Table 1에 나타내었고, 모달해석은 Lanczos방법을 이용하였다.



(a) Detail of contact part



(b) Contact distance

Fig. 5 Finite element contact model

### 3.2 접촉모델(contact model)

새이중관 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 모델개선은 셀요소를 이용하여 기하학적 형상을 최대한 모델링하였다. 단순모델과 마찬가지로 기하학적 모델 및 메쉬의 생성은 I-DEAS, 해석은 ABAQUS를 이용하여, 접촉해석을 수행한 후 모달해석을 수행하였다. Fig. 5(a)는 연료봉과 스프링이 접촉하는 부분을 상세히 나타낸 4절점 탄소성 셀요소(S4R)를 이용한 유한요소해석 모델이고, (b)는 연료봉과 스프링의 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 slave로 하여 접촉면을 지정하고, 두 접촉면 사이의 미끄럼 문제를 푸는 \*contact interference, shrink 기능을 사용하였다. 모델에서의 경계조건으로는 스프링의 양 경계에 대하여 연료봉의 길이방향으로 회전을 제외한 모든 자유도를 구속하였다. 또한 연료봉의 한쪽 방향으로의 모드만을 살펴보기 위하여 Fig. 5에서 좌우방향의 변위를 구속하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 단순모델

Table 2는 Case1 모델의 스프링부 모델의 변화에 따른 영향을 처음 5차까지의 고유진동수로 나타내었다. 스프링 지지된 경우의 고유진동수는 단순지지된 경우보다 기본진동수는 거의 유사하나 고차 진동수에 있어서는 상당히 낮은 결과를 보였다. 이러한 결과는 모드형상에서 언급되었지만 저차 모드에서는 스프링의 영향이 거의 나타나지 않지만 고차 모드에서는 스프링의 진폭이 커지면서 상대적으로 보의 고유진동수가 낮게 나타나는 것이다. 또한 접촉부를 단순 스프

Table 2 Natural frequencies(Hz) with the number of spring model for Case1

Model Mode	SS	S1	S2	S3
1st	27.26	26.98	27.1	27.04
2nd	108.6	104.4	104.4	104.4
3rd	242.8	219.6	219.6	219.6
4th	427.9	338.0	338.2	338.2
5th	661.3	427.8	428.3	428.0

링으로 모델하는 과정에서 스프링의 개수에 따라서는 진동수의 변화가 없었는데, 이것은 접촉부 길이를 초기 장착 상태에서의 예상되는 길이, 약 3 mm의 범위 내에서 고려하였기 때문에 그 영향이 크게 나타나지 않은 것으로 생각된다.

#### 4.2 접촉해석

모달해석의 전 단계에서 수행된 접촉해석을 통한 응력결과로부터 해석이 정확히 수행되었는가를 평가하였다. Fig. 6은 Case1 모델의 접촉거리 변화에 따른 새이중판 스프링과 연료봉에서의 접촉해석 결과인 최대응력강도(stress intensity)로서 접촉표면에서의 값을 나타내었다. 설계값인 0.15 mm의 접촉거리를 갖는 경우에 연료봉과 지지격자의 접촉부에서 각각 16.7 MPa(Node #159)과 246.3 MPa(Node #5298)의 응력이 작용하였으며, Fig. 7은 스프링에서의 응력분포를 나타내었다. 최대응력이 발생하는 부위는 접촉거리가 짧을 때는 초기 접촉점 근처가 되지만, 접촉거리가 길어지면서 응력은 스프링과 봉에 넓게 분포되는 결과를 보였다. 연료봉은 스프링에 비해 상대적으로 작은 응력이 작용하며, 새이중판 스프링은 변형이 크기 때문에 응력도 마찬가지로 크게 발생하지만, 재질인 Zircaloy-4의 항복응력이 344.3 MPa임을 고려할 때 약 0.3 mm 이내의 접촉거리에서는 안전한 응력범위 내에서 탄성거동을 보일 것으로 판단된다. 또한 이들 응력 결과들은 기존의 다른 스프링에 대한 해석 결과들<sup>(6)</sup>과 스프링 형상에 따라 약간 다르기는 하지만 근사한 범위 내에 존재하였다.

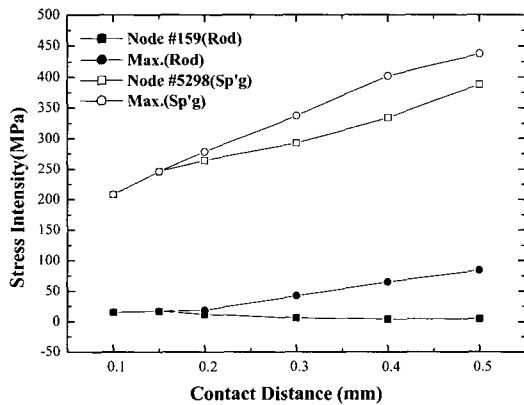


Fig. 6 Stress intensity of the rod and spring with contact distance for Case1 model

#### 4.3 고유진동수 및 모드형상

본 연구에서는 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동특성을 통하여, 개발된 새이중판 스프링 지지된 연료봉의 진동거동을 좀더 정확히 예측하고, 이를 위한 유한요소 해석모델을 개발하고자 하였다. 따라서 Case1의 스프링으로 양단 지지된 단일구간 연료봉에 대하여 단순모델과 접촉모델을 구성하였고, 시험과 해석 결과를 통하여 접촉모델의 타당성을 보였다. 결과들은 스프링 지지된 연료봉의 고유진동수, 모드형상, 시험과 해석결과와의 모드의 상호관계를 나타내는 모달 확신기준<sup>(19)</sup>(modal assurance criteria : MAC) 값을 구하여 두 결과의 신뢰성을 평가하였다.

Table 3에는 Case1 모델에 대한 진동시험, 단순모델, 접촉모델을 통한 처음 5차까지의 고유진동수를 나타내었다. 진동시험을 통한 기본진동수는 57.77 Hz를 보였고, 유한요소해석에서 스프링을 이용한 단순모델은 26.98 Hz로 시험에 비해 약 53% 정도 낮은 결과를 보였고, 고차 모드에서도 대부분 큰 차이를 보였다. 이것은 특성시험을 통하여 구한 새이중판 스프

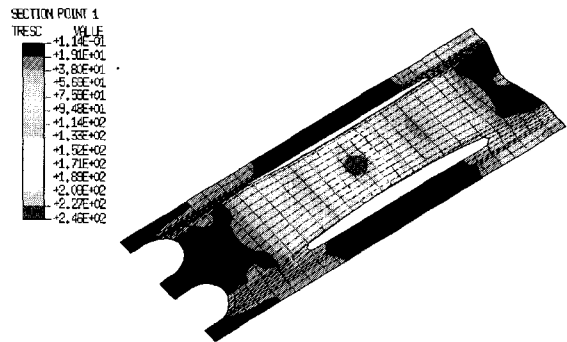


Fig. 7 Stress intensity contour of New Doublet grid with 0.15 mm contact distance for Case1 model

Table 3 Comparison of natural frequencies for Case1 model

Mode	Test	Simple model	MAC	Error*	Contact model	MAC	Error*
1st	57.77	26.98	0.996	53.3	56.25	0.999	2.6
2nd	160.8	104.4	0.980	35.1	148.1	0.969	7.8
3rd	294.0	219.6	0.985	25.3	262.7	0.973	10.6
4th	410.4	338.0	0.825	17.6	376.9	0.745	8.1
5th	702.5	427.8	0.765	39.1	506.2	0.247	28.0

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

링의 강성이 실제보다 낮게 평가되었거나, 해석에서는 지지격자와 연료봉의 복잡한 접촉거동을 반영하지 못하기 때문에 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 접촉 해석을 연계하여 해석한 접촉모델 사용시 기본진동수는 56.25 Hz로 시험결과와 잘 일치하였고, 고차 모드에서의 진동수 또한 좋은 일치를 보였다. Case1의 시험과 단순모델, 시험과 접촉모델을 사용한 모드의 상호관계를 보이는 MAC 그래프를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 단순모델의 경우 고유진동수가 비교적 큰 차이를 보이고 있지만, 모드에 있어서는 3차 모드까지 0.97이상의 높은 신뢰도를 보였고, 4차와 5차 모드들도 0.75이상의 값을 보여, 실험을 통한 모드의 신뢰성을 확인하였다. 또한 접촉모델의 경우에 Correlation은 연료봉의 상단부 길이방향 절점을 사용하였으며, 비록 5차 모드에서는 낮은 신뢰성을 보였으나, 4차까지의 MAC 값은 좋은 일치를 보여 접촉모델과 시험결과의 신뢰성을 확인하였다.

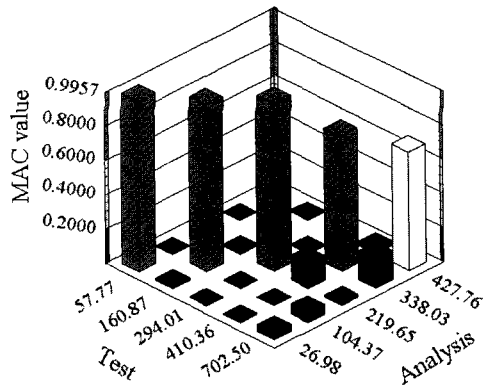


Fig. 8 MAC values between the test and simple model for Case1

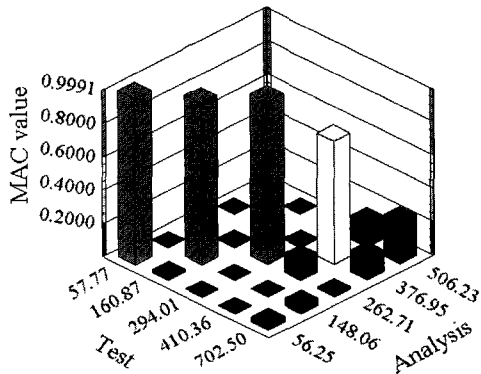


Fig. 9 MAC values between the test and contact model for Case1

Fig. 10은 시험과 단순모델의 해석을 통한 모드형상의 비교를 나타낸다. MAC 그래프와 모드형상에서 알 수 있는 바와 같이 저차 모드에서는 스프링부의 변위가 거의 일어나지 않으나, 고차모드에서는 스프링 접촉부의 변위가 크게 발생한다. 그러나 시험에서는 스프링부의 변위를 측정하기가 어려워 고정된 것으로 처리하였기 때문에 스프링 지지부에서는 약간의 불일치가 발생하고 이것이 MAC 값을 좋지 않게 하는 원인으로 작용하였다. Fig. 11은 접촉해석을 연계한 접촉모델의 고유진동모드를 나타내었다. 단순모델에 대한 결과와 마찬가지로 고유진동수가 높아짐에 따라 스프링 부위에서의 변위가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 또한 접촉모델은 셸요소를 사용하여 연료봉 형상을 모델하였기 때문에 기하학적인 형상으로 인하여 고유진동수가 높아질수록 연료봉 원주방향의 모드가 나타나게 되며, 이것은 시험과 해석을 통한 모드간의 신뢰성이 떨어뜨리는 또 다른 원인 중의 하나로 생각된다.

Case1 모델에 대한 시험과 접촉해석 연계한 접촉모델의 결과비교를 통하여, 유한요소 접촉모델에 대한 해석방법의 타당성 및 결과의 신뢰성을 확신하게 되었다. 따라서 이들 모델을 5개의 지지격자 스프링으로 연속 지지된 길이 2,189 mm의 연료봉의 진동해석

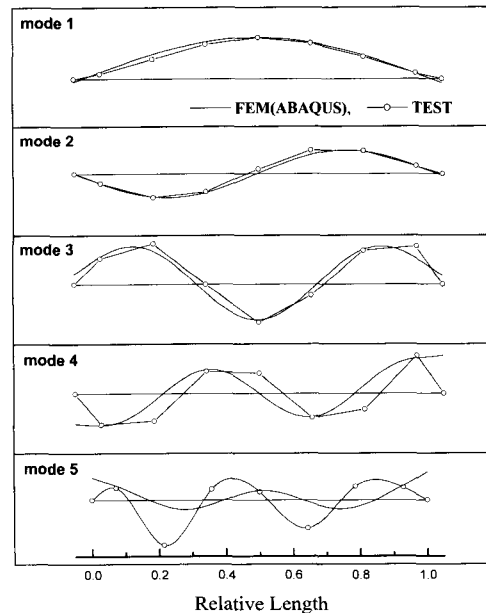


Fig. 10 Comparison of mode shapes between the test and simple model for Case1

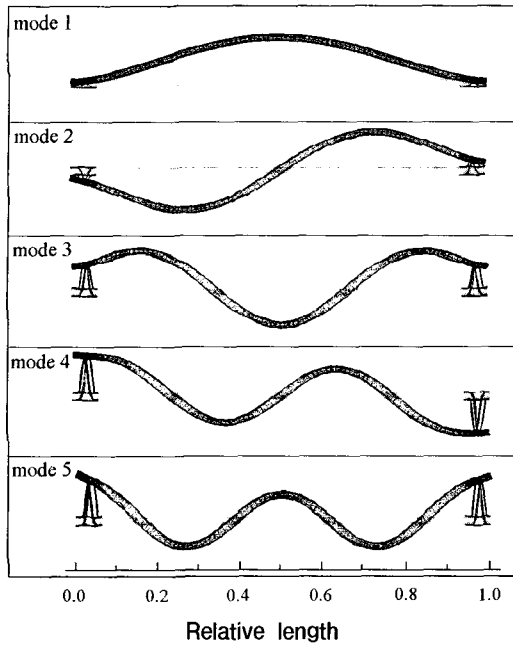


Fig. 11 Mode shapes of contact model for Case1

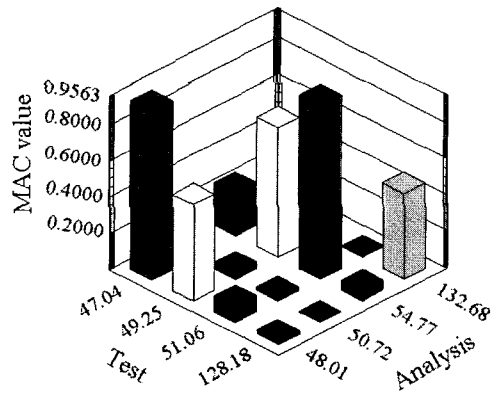


Fig. 12 MAC values between the test and contact model for Case2

Table 4 Comparison of natural frequencies for Case2 model

Mode	Test (12)	Simple model(12)	MAC	Error*	Contact model	MAC	Error*
1st	47.04	32.23	0.950	31.5	48.01	0.932	-2.1
2nd	49.25	39.86	0.130	19.1	50.72	0.034	-3.0
3rd	51.06	50.32	0.940	1.45	54.77	0.956	-7.2
4th	-	70.40	-	-	99.30	-	-
5th	128.2	114.9	0.814	10.4	132.7	0.471	-3.0

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

에 적용하였고, 결과를 Table 4에 나타내었다. Case2 모델에 대한 유한요소 단순모델 및 시험결과 등은 참고문헌<sup>(12)</sup>에서 언급되었으며, 여기서는 개선된 모델에 대한 결과를 추가하여 나타내었다. 기존의 연구에서는 새이중판 지지격자를 단순 스프링 요소로서 모사하였고, Case1에서의 마찬가지로 시험 결과와 비교적 큰 차이를 보였다. 이때 네 번째 진동수는 실험에서 얻지 못하였기 때문에 나타내지 못하였다. 접촉모델을

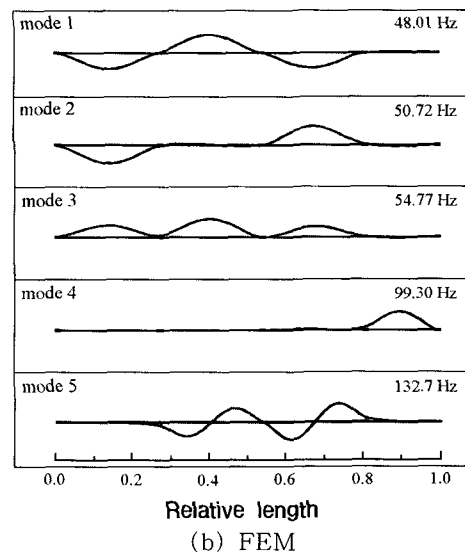
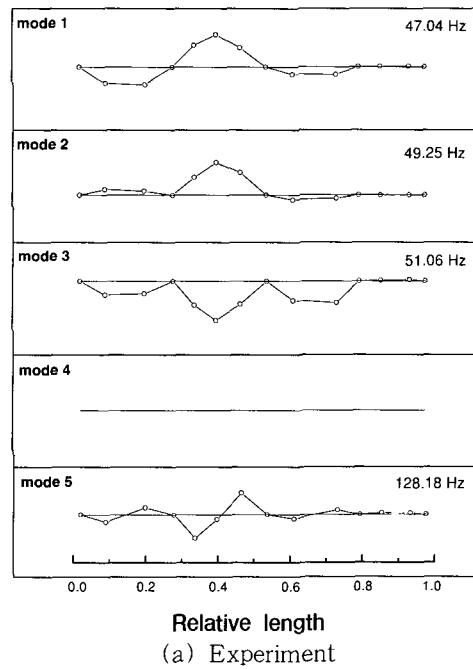


Fig. 13 Mode shapes of contact model for Case2

적용하여 해석한 결과, 새이중판 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 기본진동수는 개선 전 스프링을 사용하였을 때 32.23 Hz의 진동수가 접촉을 연계하여 해석하였을 때 48.01 Hz로 증가하여, 시험 결과인 47.04 Hz와 2.1%의 오차를 보이며 매우 잘 일치하였다. 뿐만 아니라 고차 모드에서의 고유진동수도 시험 결과와 8% 이내의 오차범위에서 잘 일치하였다. Fig. 12과 13는 각각 MAC 그래프 및 접촉해석 모델을 이용한 해석 모드형상을 나타내었다. 실험에서는 가진기의 부착위치로 인하여 2차 모드에서 왜곡이 발생하므로 모드간의 신뢰성이 떨어져 낮은 MAC 값을 보였으나, 전체적인 모드의 거동은 시험과 해석결과가 잘 일치하고 있다.

이상의 고유진동수, 모드형상, MAC 값 등의 결과로부터 면접촉을 하는 새이중판 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 경우, 모델링과 계산시간 등에서 단순모델보다는 더 많은 노력이 필요하지만, 좀더 정확한 고유진동수를 얻을 수 있다. 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 동적거동을 예측하는데 이용될 수 있다.

## 5. 결 론

(1) 양단이 새이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 고유진동수 계산에 있어서 스프링을 사용한 단순모델은 시험결과에 비해 평균 30% 정도 낮게 평가되었고, 고차 모드에서는 스프링부의 진폭이 크게 발생하는 거동을 확인할 수 있었으며, 이는 시험결과와의 비교에서 MAC 값을 좋지 않게 하는 원인이 되었다.

(2) 진동해석에 앞서 수행된 접촉해석 결과 설계치인 0.15 mm의 접촉거리를 갖는 경우, 연료봉과 스프링에 작용하는 최대 응력강도는 각각 16.7 MPa와 246.3 MPa로 Zircaloy-4 재료의 항복응력인 344.3 MPa 이내의 탄성범위에 존재하였다.

(3) 접촉을 고려한 접촉모델로 진동해석을 수행한 결과, Case1 모델의 기본진동수는 56.25 Hz로 시험결과인 57.77 Hz와 잘 일치하였고, 고차모드에서도 단순모델에 비해 오차의 범위가 상당히 감소하였다. 또

한 5개의 지지격자체로 지지된 2.189 mm의 연료봉 (Case2)에 대한 해석결과도 기존의 단순모델에서 보였던 30% 정도의 고유진동수의 차이를 8% 이내로 감소시킬 수 있었다.

(4) Case1과 Case2 모델의 고유진동수 및 모드결과들을 통하여 접촉해석을 연계한 해석방법 및 모델의 신뢰성을 확인하였고, 추후 새이중판 지지격자로 다점 지지된 연료봉의 진동거동을 좀더 정확히 예측하는데 개선된 유한요소모델이 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능지격자구조기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Paidoussis, M. P., 1981, "Fluidelastic Vibration of Cylinder Arrays in Axial and Cross Flow," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 76, pp. 329~360.
- (2) 이영신, 강영환, 최명환, 신도섭, 2000, "진동 시험 및 해석을 통한 하나로 캡슐 구조물의 구조건전성 평가," 한국소음진동공학회는문집, 제 10 권, 제 2 호, pp. 261~268.
- (3) Jhung, M. J., Jang, Y. K. and Lee, J. B., 1996, "Structural Integrity of a Fuel Assembly for the Secondary Side Pipe Breaks," 한국소음진동공학회는문집, 제 6 권, 제 6 호, pp. 827~834.
- (4) Stoller Report, 1995, "A Study of Grid to Rod Fretting Wear in PWR Fuel Assemblies," SMSC, Vol. 1.
- (5) 송기남, 윤경호, 강홍석, 김형규, 2002, "경수로용 신형핵연료 지지격자의 기계/구조적 특성 평가," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, KSME02S004, pp. 19~24.
- (6) Yoon, K. H., Song, K. N., Kang, H. S. and Kim, H. K., 2001, "Mechanical/Structural Characteristic Test and FEA of a Spacer Grid Spring/Dimple for PWR Fuel Assembly," KAERI/TR-1763/2001, KAERI.



- (7) 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.
- (8) 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/TR-1738/2001, KAERI.
- (9) 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 the Korean Nuclear Society, Vol. 33, No. 1, pp. 93~101.
- (10) 강홍석, 송기남, 윤경호, 정연호, 임정식, 1998, "회전 및 굽힘 스프링 기구로 연속지지된 핵연료 봉의 진동연구," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 454~460.
- (11) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2000, "지지격자 스프링으로 다점지지된 환형 핵연료봉의 고유진동해석," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 639~646.
- (12) 최명환, 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2003, "지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성," 대한기계학회논문집A, 제 27 권, 제 3 호, pp. 424~ 431.
- (13) 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.
- (14) 최명환, 강홍석, 송기남, 윤경호, 김형규, 2002, "접촉해석이 연계된 스프링 지지보의 진동해석," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1216~1221.
- (15) 이상설 외 7인, 2000, "연료봉 지지거동 및 진동해석 모델검증시험," KAERI/CM-328/99, 한국항공우주연구원.
- (16) Hibbit, H. D., Karlsson, G. I. and Sorensen, E. P., 1999, ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.8, HKS Inc., RI, USA.
- (17) SDRC, 2000, I-DEAS Master Series™, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
- (18) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 정연호, 2002, "핵연료집합체 지지격자로 지지된 연료봉의 진동특성 -개발중인 지지격자와 모의 연료봉의 진동시험," 4th ASINCO 9th KINS Workshop on the Integrity of Nuclear Safety, B07/3.
- (19) Ewins, D. J., 1984, Modal Testing : Theory and Practice, John Wiley & Sons Inc..