

접촉해석이 연계된 스프링 지지보의 진동해석

Vibration Analysis of Beam Supported by Springs Considering a Contact

최명환* · 강홍석** · 송기남** · 윤경호** · 김형규**

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

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 are vibrating within the reactor due to coolant flow. Since the vibration, what is called flow-induced vibration(FIV), can wear away the surface of the fuel rod, it is important to understand the vibration characteristics of it. 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 by the new model show good agreement to experiment as compared with the ones by previous model. In addition, the new FE model is applied to the vibration analysis for the dummy rod of 2.19 m tall continuously supported by five ND spacer grids. It is also obtained that the analysis results by the new FE model well agree to experiment ones as the single-spanned rod.

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체에서 연료봉(fuel rod)은 원통형 관(tube) 내부에 UO_2 소결체(pellet)를 포함하고 있으며, 원자로내의 가압된 냉각수의 유동으로 인한 난류와 횡류 운동은 연료봉의 유체유발진동(flow induced vibration: FIV)을 발생시킨다. 이러한 진동현상은 연료봉과 연료봉을 지지하는 지지격자(spacer grid) 지지부 사이에서의 상대운동으로 인하여 연료봉의 프레팅 마멸 손상을 일으키게 되어 연료봉의 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 핵연료의 한계수명(3~5년)까지 기계적인 원인에 의해 연료봉이 손상되지 않도록 하기 위해서는 지지격자 개발단계에서부터 연료

봉과 지지격자 간의 거동에 대한 고려가 필요하다.

지지격자는 원자로 운전 환경하에서 분리현상의 발생없이 안전하게 설계되었는지를 검증하는 절차가 필요하고, 이를 위하여 시험 및 해석적인 방법에 의한 격자체에 대한 충격 및 좌굴시험, 연료봉 지지부위에 대한 프레팅 마멸시험 그리고 지지성능 등과 같은 기본 특성시험이 수행되어 왔다[1-3]. 또한 핵연료봉의 진동특성은 지지격자 스프링의 설계에 따라서 달라질 수 있으며, 이를 통하여 지지격자 스프링들의 비교우위도 평가할 수 있다[4-5].

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, 이를 위해서는 신뢰도 있는 이론 모델의 개발 및 검증이 필수적이다. 한국원자력연구소에서는 그동안 개발되어온 지지격자로 지지된 연료봉에 대한 진동시험을

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

** 한국원자력연구소

통하여 진동특성을 파악하고, 이를 모사하기 위한 이론적 모델의 검증절차에 대한 연구가 수행되어 왔다 [6-8]. 또한 최근 수행된 새 이중판(New Doublet) 지지격자로 지지된 연료봉의 진동시험 결과[9]에서는 이론해석의 결과가 실험결과에 비하여 상당히 낮게 평가되는 경향을 보였다. 기존의 유한요소해석에서 지지격자의 스프링(Spring)과 딴뎀(dimple)은 등가의 강성을 갖는 단순한 스프링 요소로 모델링되었다. 그러나 새 이중판 지지격자는 연료봉을 지지할 때 반경방향으로 약 0.15mm의 접촉거리(contact distance)를 갖고 면접촉을 하도록 설계되었기 때문에 이를 단순한 스프링으로 모델하는 과정에서 오차가 발생하는 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 기계적, 구조적 성능이 우수한 것으로 평가된 새 이중판 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동특성을 통한, 유한요소 해석모델의 개선에 대하여 기술하였다. 양단이 새 이중판 스프링으로 지지된 단일 스펠(single span) 연료봉의 접촉해석을 연계한 개선모델을 제시하였다. 접촉모델을 통한 진동해석 및 모달시험 결과의 비교를 통하여 유한요소 모델의 신뢰성을 검증하였고, 이전의 연구에서 시험과 해석결과에 약 30%의 차이를 보였던 5개의 지지격자체로 연속지지된 연료봉의 진동해석에 접촉모델을 적용하였다. 접촉 및 진동해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[10]를 사용하였으며, 기하학적 형상 모델링 및 유한요소해석을 위한 절점 및 요소의 생성에 I-DEAS[11]를 사용하였고, 또한 진동시험 및 해석과 시험 결과의 비교/분석은 I-DEAS TDAS를 사용하였다.

2. 진동시험

2.1 시험시편

새 이중판 지지격자의 스프링 형상과 5×5형 부분격자체 형상은 Fig. 1과 같으며, 기존의 이중판 노출형 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[9].

본 연구에서는 Table 1과 같이 두 경우의 연료봉을 해석모델로 사용하였다. CASE1은 스프링으로 양단 지지된 길이 570mm 연료봉의 단일스팬 모델이고, CASE2는 참고문헌[9]에서 제시된 바와같이 길이 2.19m의 5개의 지지격자체로 연료봉이 연속지지된 모

델이다. 진동시험에 사용된 모의 연료봉이 실제 핵연료봉과 다른 점은 10.4 kg/m³의 밀도를 갖는 UO₂ 소결체를 11.4 kg/m³의 밀도를 갖는 납봉으로 대체하여 제작한 것 뿐이고, 소결체를 제외한 모든 부품은 실제 핵연료봉의 부품을 사용하였다.



(a) 5×5 type partial grid

(b) Unit cell

Fig. 1 Shape of New Doublet spacer grids

Table 1 Specification of the test specimen.

	CASE1	CASE2
Length (mm)	570	2190
No. of spacer grids	2개	5개
Rod mass (kg)	0.415	1.484
Density (kg/m ³) (stack region)	43,368	43,368
No. of element /node (simple model)	68/69	252/253
No. of element /node (contact model)	6232/7032	13427/15398

2.2 시험개요

유한요소 모델 검증 및 비교를 위한 CASE1 모델의 진동특성을 얻기 위하여 충격가진법(impact excitation)을 이용한 진동시험을 수행하였다. 시험에 사용한 센서는 충격해머(impact 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 Data Acquisition System(VXI HP7500 Series B)에 연결된다. 마지막으로 이들 신호는 HP x2000 W/S에 설치되어 있는 I-DEAS의 TDAS에서 데이터 획득 및 후처리를 하게 된다. Fig. 2는 진동시험의 개략도를 나타내었다. CASE2의 실험에 대한 내용은 참고문헌[8,9]에 상세히 언급되어 있으며, 본 논문에서는 결과만을 언급한다.

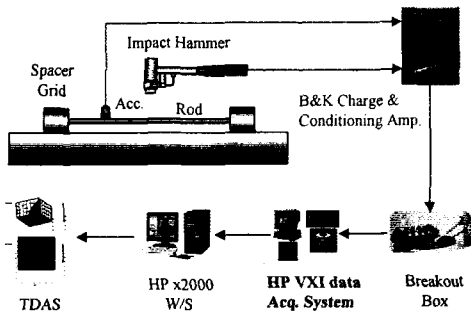


Fig. 2 Schematic view of the modal testing

3. 유한요소해석

새 이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 유한요소모델에 있어서 스프링을 이용한 단순모델은 기본진동수에 있어서 실험결과와 30% 이상의 큰 오차를 보였었다[9]. 이것은 실제로 새 이중판 지지격자가 연료봉과 면접촉을 하는 구조물인데 이를 단순한 스프링으로 보았기 때문이라 판단된다. 따라서 해석모델을 개선하기 위하여 I-DEAS와 ABAQUS를 이용한 3차원 기하형상을 모델하고, 접촉해석을 고려한 모달해석이 수행될 수 있도록 유한요소 모델을 개발하였다.

3.1 단순모델(simple model)

스프링을 이용한 단순모델에서 연료봉은 ABAQUS에서 제공하는 2절점 선형 요소(B21)를 이용하여 모델링하였고, 지지격자 스프링과 땀몰은 2D 스프링 요소(SPRINGA)를 사용하였다. Fig. 3은 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 모델한 것이다. 이때 해석에서 스프링의 강성은 실험을 통하여 얻은 값, 114 N/mm을 이용하였고, S2나 S3의 경우처럼 n개의 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 수행하였으며, 모달해석은 Lanczos방법을 이용하였다.

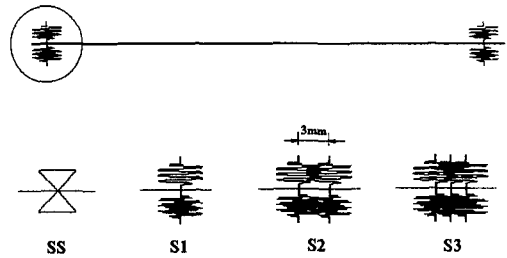


Fig. 3 Simple spring model for CASE1

3.2 접촉모델(contact model)

새 이중판 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동해석을 위한 모델개선은 셀요소를 이용하여 기하학적 형상을 최대한 모델링하였다. 단순모델과 마찬가지로 기하학적 모델 및 매쉬의 생성은 I-DEAS, 해석은 ABAQUS를 이용하여, 접촉해석을 수행한 후 모달해석을 수행하였다. Fig. 4(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 0.15mm의 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 방향의 모드만을 살펴보기 위하여 Fig. 4에서 좌우방향의 변위를 구속하였다.

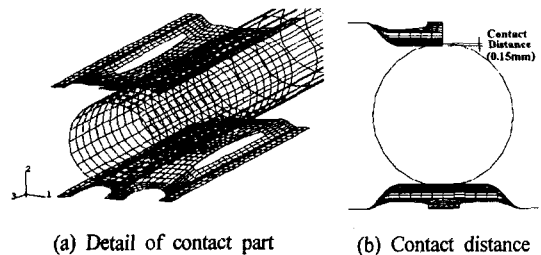


Fig. 4 Finite element contact model for CASE1

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 고차모드에서는 스프링의 변위가 커지면서 상대적으로 보의 고유진동수가 낮게 나타나는 것이다. 또한 접촉부를 단순 스프링으로 모델하는 과정에서 스프링의 개수에 따라서는 진동수의 변화가 없었는데, 이것은 접촉부 길이가 약 3mm로 작기 때문이라 생각된다.

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

4.2 접촉해석

모달해석의 전 단계에서 수행된 접촉해석을 통한 응력결과로부터 해석이 정확히 수행되었는가를 예측하였다. Fig. 5는 CASE1 모델의 접촉거리 변화에 따른 새 이중판 스프링과 연료봉에서의 접촉해석 결과인 최대응력강도(stress intensity)로서 접촉표면에서의 값을 나타내었다. 설계값인 0.15mm의 접촉거리를 갖는 경우에 연료봉과 지지격자의 접촉부에서 각각 16.7MPa (Node #159)과 246.3MPa (Node #5298)의 응력이 작용하였으며, Fig. 6은 스프링에서의 응력분포를 나타내었다. 최대응력이 발생하는 부위는 접촉거리가 짧을때는 초기 접촉점 근처가 되지만, 접촉거리가 길어지면서 응력은 스프링과 봉에 넓게 분포되는 결과를 보였다. 연료봉은 스프링에 비해 상대적으로 작은 응력이 작용하며, 새 이중판 스프링은 변형이 크기 때문에 응력도 마찬가지로 크게 발생하지만, 재질인 Zircaloy-4의 항복응력이 344.3MPa임을 고려할 때 약 0.3mm이내의 접촉거리에서는 안전한 응력범위 내에서 탄성거동을 보일 것으로 판단된다. 또한 이들

응력 결과들은 기존의 다른 스프링에 대한 해석 결과들[2]과 스프링 형상에 따라 약간 다르기는 하지만 근사한 범위 내에 존재하였다.

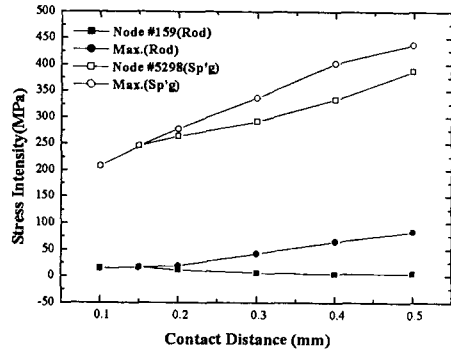


Fig. 5 Stress intensity of the rod and spring with contact distance for CASE1 model

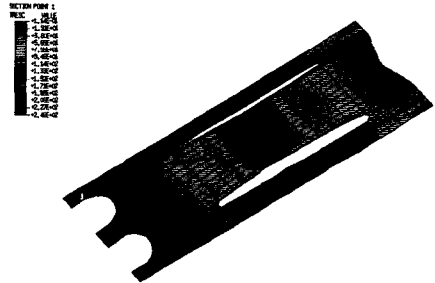


Fig. 6 Stress intensity contour of New Doublet grid with 0.15mm contact distance for CASE1 model

4.3 고유진동수 및 모드형상

본 연구에서는 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 진동특성을 통하여, 개발된 새 이중판 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 해석결과의 모드의 상호관계를 나타내는 모달확신기준(modal assurance criteria: MAC) 값을 구하여 두 결과의 신뢰성을 평가하였다.

Table 3에는 CASE1 모델에 대한 진동시험, 단순모델, 접촉모델을 통한 처음 5차까지의 고유진동수의 변화를 나타내었다. 진동시험을 통한 기본진동수는 57.77Hz를 보였으나, 유한요소해석에서 스프링을 이

용한 단순모델은 26.98Hz로 시험에 비해 약 53%정도 낮은 결과를 보였고, 고차 모드에서도 대부분 큰 오차를 보였다. 그러나 접촉해석을 연계하여 해석한 접촉모델에서는 56.25Hz로 시험결과와 잘 일치하였고, 고차 모드에서의 진동수 또한 좋은 일치를 보였다. CASE1 모델의 단순모델과 시험결과와의 모드의 상호관계를 보이는 MAC 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 두 결과가 고유진동수에 있어서는 많은 차이를 보이고 있지만, 모드에 있어서는 3차 모드까지 0.97이상의 높은 신뢰도를 보였고, 4차와 5차 모드들도 0.7이상의 값을 보여, 실험을 통한 모드형상의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

Table 3 Comparison of natural frequencies for CASE1 model

Method Mode	Test	Simple model	Error*	Contact model	Error*
1st	57.77	26.98	53.3	56.25	2.6
2nd	160.8	104.4	35.1	148.1	-7.8
3rd	294.0	219.6	25.3	262.7	10.6
4th	410.4	338.0	17.6	376.9	8.1
5th	702.5	427.8	39.1	506.2	28.0

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

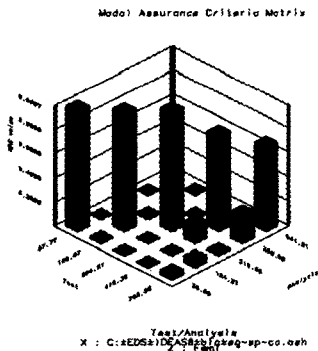


Fig. 7 MAC values between the test and simple model for CASE1

Fig. 8은 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 정확히 측정하기가 어려워 고정된 것으로 처리하였기 때문에 스프링 지지부에서는 약간의 불일치가 발생하고 이것이 MAC 값을 좋지 않게 하는 원인으로 작용하였다. Fig. 9는 접촉해석을 연계한 접촉모델의 고유진동모드를 나타낸 것으로,

전체적인 형상으로 볼 때 시험 모드형상을 잘 모사하고 있으며, 단순모델에 대한 결과와 마찬가지로 고유진동수가 높아짐에 따라서 스프링 부위에서의 변위가 크게 발생함을 확인할 수 있다.

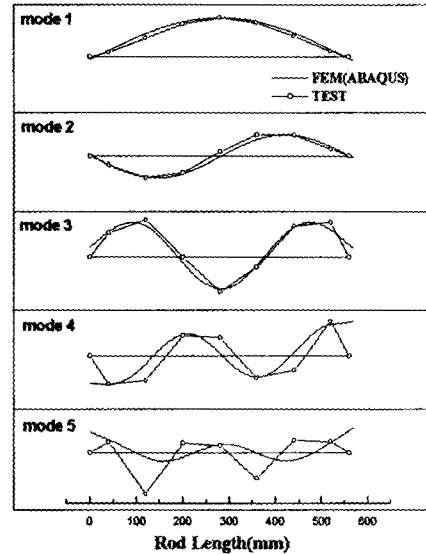


Fig. 8 Comparison of mode shapes between the test and simple model for CASE1

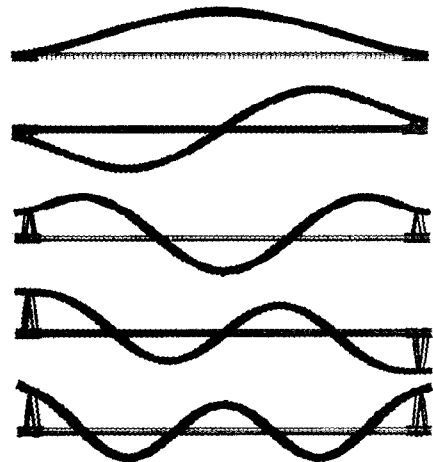


Fig. 9 Mode shapes of contact model for CASE1

CASE1 모델에 대한 시험과 접촉해석 연계한 접촉모델의 결과비교를 통하여, 접촉을 고려한 접촉모델에 대한 해석방법의 타당성 및 결과의 신뢰성을 확인하게 되었다. 따라서 이들 모델을 5개의 지지격자 스

프링으로 연속 지지된 길이 2.19m의 연료봉의 진동해석에 적용하였고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. CASE2 모델에 대한 유한요소 단순모델 및 시험결과 등은 참고문헌[9]에서 언급되었으며, 여기서는 개선된 모델에 대한 결과를 추가하여 나타내었다. 기존의 연구에서는 새 이중판 지지격자를 단순 스프링으로 모사하였고, CASE1에서와 마찬가지로 시험 결과와 큰 차이를 보였다. 그러나 접촉모델을 이용하여 해석한 결과 기본진동수 뿐만아니라 고차에서의 고유진동수도 8%이내의 오차범위에서 잘 일치하였다. 따라서 면접촉을 하는 새 이중판 지지격자 스프링으로 지지된 연료봉의 경우, 접촉해석을 연계한 진동해석이 좀더 정확한 연료봉의 동적거동을 얻는데 이용될 수 있을 것으로 확신한다.

Table 4 Comparison of natural frequencies for CASE2 model

Method Mode	Test[9]	Simple model[9]	Error*	Contact model	Error*
1st	47.04	32.23	31.5	48.01	-2.1
2nd	49.25	39.86	19.1	50.72	-3.0
3rd	51.06	50.32	1.45	54.77	-7.2
4th	-	70.40	-	99.30	-
5th	128.2	114.9	10.4	132.0	-3.0

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

5. 결론

(1) 양단이 새 이중판 지지격자로 지지된 연료봉의 고유진동수 계산에 있어서 스프링을 사용한 단순모델은 시험결과에 비해 30%이상 낮게 평가되었다.

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

(3) 접촉해석을 연계한 접촉모델로 진동해석을 수행한 결과, CASE1 모델의 기본진동수는 56.25Hz로 시험결과인 57.77Hz와 잘 일치하였고, 고차모드에서도 단순모델에 비해 오차의 범위가 상당히 감소하였다. 또한 5개의 지지격자체로 지지된 2.19m의 연료봉(CASE2)에 대한 해석결과도 기존의 단순모델에서 보였던 고유진동수의 차이를 8%이내로 감소시킬 수 있었다.

(4) CASE1과 CASE2 모델의 고유진동수 및 모드결

과들을 통하여 접촉해석을 연계한 해석방법 및 모델의 신뢰성을 확인하였고, 추후 새 이중판 지지격자로 다점 지지된 연료봉의 진동거동을 예측하는데 개선된 유한요소모델이 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능지지격자구조기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kang, H.S. et al., 2001, Evaluation of Spacer Grid Support Performance by Vibration Test, KAERI/TR-1738/2001, KAERI.
- (2) 윤경호 등, 2001, "지지격자 스프링/덱플의 기계적 특성시험 및 유한요소 해석", KAERI/TR-1763/2001, 한국원자력연구소.
- (3) 윤경호 등, 1999, "일체형 원자로용 지지격자 시편의 기계적 성능평가 시험", KAERI/TR-1147/98, 한국원자력연구소.
- (4) Kang, H.S., et al., 1998, "A Study on the Vibrational Behavior of the Fuel Rods Continuously Supported by a Rotary and Bent Spring System", 한국소음진동공학회 1998춘계학술대회논문집, pp.454~460.
- (5) 강홍석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2000, "지지격자 스프링으로 다점지지된 환경 핵연료봉의 고유진동해석", 한국소음진동공학회 2000춘계학술발표회 논문집, pp.639~646.
- (6) 강홍석 등, 2001, "경수로 핵연료집합체 지지격자로 지지된 핵연료봉의 진동해석", KAERI/TR-1753/2001, 한국원자력연구소.
- (7) 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, J. of the KNS, Vol. 33, No. 1, pp.73~82.
- (8) 이상설 등, 2000, "연료봉 지지거동 및 진동해석 모델 검증시험", KAERI/CM-328/99, 한국항공우주연구소.
- (9) 최명환 등, 2002, "최적화 H형 및 새 이중판 지지격자로 연속지지된 모의 연료봉의 진동해석", KAERI/TR-2063/2002, 한국원자력연구소.
- (10) HKS, 1999, User's Manual, ABAQUS Ver. 5.8.
- (11) MTS System Corporation, 2000, User's Manual, IDEAS Master Series 8.0.