

최적화 H형 지지격자로 구성된 5X5 부분 연료집합체의 진동해석 및 시험

Vibration Analysis and Test of the 5X5 Partial Fuel Assembly Consisting of the Optimized H Type Spacer Grids

강홍석, 이강희, 윤경호, 송기남, 정연호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국원자력연구소가 개발한 최적화 H형 지지격자로 만든 5X5 부분 연료집합체의 공기중 진동해석과 시험을 수행하였다. 해석 및 시험에 사용된 부분 연료집합체는 실제 경수로 핵연료집합체 길이의 대략 1/2로서 5개의 지지격자체, 23개의 모의 연료봉, 그리고 2개의 안내관으로 구성되었고 지지격자와 안내관은 안내관 슬리브를 매개로 용접되었다. 유한요소 해석으로 얻은 1차~3차 고유진동수는 5.1 Hz, 11.5 Hz, 20.1 Hz 이었으며 시험으로 얻은 결과는 6.3 Hz, 15.0 Hz, 24.5 Hz로 나타났다. 해석과 시험으로 얻은 고유진동수와 모드형상은 대체로 잘 일치하는 것으로 판단되었다. 부분 연료집합체에 장전된 모의 연료봉의 일차 고유진동수는 40 Hz에서 45 Hz 사이에 있는 것으로 판단되었다.

Abstract

A FE vibration analysis and test in air have been performed for a 5X5 partial Fuel Assembly(FA) made by the optimized H type spacer grids. The partial FA consists of 5 spacer grids, 23 dummy fuel rods and 2 guide tubes. The spacer grids and the guide tubes are connected by the medium of the guide tube sleeves. For the first to third natural frequency, 5.1 Hz, 11.5 Hz and 20.1 Hz are obtained by FE analysis while 6.3 Hz, 15.0 Hz, 24.5 Hz by the modal test. It is judged that the 1st natural frequency of the dummy rod in the 5x5 partial FA is between the 40 Hz and 45 Hz.

1. 서론

원자력연구소의 고성능지지격자개발 과제는 경수로 핵연료집합체의 핵심부품인 지지격자체를 개발하고 있다. 지금까지 본 과제는 16 종의 지지격자를 고안하고 국내는 물론 미국 및 해외 여러 나라의 특허를 취득하는 성과를 올렸다. 지지격자를 고안하고 성능을 개선하는 연구의 일환으로 그림 1과 같은 5×5 크기의 이중판 지지격자체와 실제 연료봉의 반 크기인 모의 연료봉 그리고 2개의 안내관으로 구성된 부분 연료집합체를 제조하고 이에 대한 진동시험 및 유한요소해석을 수행한 바 있다[1-2].

당 연구소에서 고안한 지지격자체 중에 성능이 우수한 H형 지지격자체는 지지격자 스프링의 형상이 'H' 자와 유사하기 때문에 H형으로 명명된 지지격자체로서 연료봉의 프레팅 마멸 저항성이 크도록 고안된 특징이 있다. 5×5 크기의 H형 지지격자에 안내관 슬리브를 부착한 시편은 그림 2와 같다. 금번의 연구는 이런 H형 지지격자체로 구성된 부분 핵연료집합체로 수행한 진동시험과 유한요소 해석에 관한 것이다.



그림 1 5×5 이중판 지지격자체



그림 2 5×5 H형 지지격자체

부분 연료집합체의 진동연구는 유체유발진동 연구를 위한 사전 연구로서, 축류 유동장에 놓일 부분 연료집합체 및 핵연료봉의 유체유발진동 시험을 위한 기초 자료생산을 위한 것이다. 기존의 연구 및 이번 연구에 사용한 2 다발의 부분 연료집합체는 현재 본 과제에서 구축중인 유체유발진동 루프에 장전될 집합체로서 핵연료를 생산하고 있는 한전원자력연료주식회사에서 실제 핵연료 생산 공정을 적용하여 제작한 것이다. 모의 핵연료집합체에는 납봉으로 채워진 모의 연료봉과 특수 가속도계가 장전될 빈 연료봉 등 밀도가 다른 2종류의 연료봉이 혼재하게 되었다. 안내관은 그림 2와 같이 슬리브를 매개로 지지격자체와 연결되는 방법을 택하였다.

유한요소해석모델은 이러한 부분들을 반영하여 만들어졌다. 유한요소해석모델은 I-DEAS[3]를 이용하여 만들었으나 실제 해석은 모델 파일을 변환하여 ABAQUS[4]로 수행하였다. 유한요소해석에 이용된 부분 핵연료집합체의 제원은 다음의 표와 같다.

표 1 부분 핵연료집합체의 물성치 및 제원

물성치/ 재원		값
모의 연료봉	납봉/빈봉 밀도(kg_m/m^3)	39050 / 6600
	내경 (mm)	8.32
	외경 (mm)	9.5
안내관	내경 (mm)	9.6
	외경 (mm)	12.0
안내관 슬리브	내경 (mm)	12.5
	외경 (mm)	13.5
지지격자	관의 두께 X 높이 (mm)	.475 X 40
	스프링 상수 (N/mm)	200
공통사항	프와송의 비	0.294
	영의 계수 (N/mm^2)	10.8E10

유한요소해석모델에서 지지격자 관은 4절점 쉘 요소로 모델링되어 1개의 지지격자체 당 6,780 개의 요소로 분할되었다. 지지격자 스프링은 사방에서 1개의 스프링으로 핵연료봉을 지지한다고 가정하여 1개의 쉘 당 4개의 스프링을 사용하고 스프링은 2차원 스프링 요소(2-D SPRINGA)로 모델링하였다. 연료봉은 3차원 파이프(3-D PIPE)요소로 모델링하였는데 하나의 연료봉은 547개의 요소로 분할하였기 때문에 23개의 연료봉을 위하여 총 12,581개의 요소를 사용하였다. 안내관은 3차원 파이프 요소(3-D PIPE)로 모델링하였고, 지지격자와는 슬리브를 매개로 완전히 연결(MPC: Multi-Point Constraint)된 것으로 가정하였다. 안내관의 길이방향으로 배열되는 지지격자체는 5개이며 지지격자체와 지지격자체 사이의 간격은 상부 3 군데는 564 mm, 그리고 최 하단 한 곳은 400 mm로 설정되었다. 부분 연료집합체 1개를 모델링하는데 총 47,716개의 요소가 소요되었다. 다음의 그림 3은 H형 부분 연료집합체의 유한요소 모델을 도시한 것이다.

한편, 모달변수(고유진동수 및 모드형상)를 얻기 위한 시험은 충격해머로 가진하고 가속도계로 진동신호를 취득한 후 분석하는 전형적인 자유진동시험 방법을 택하였다. 가속도 신호는 5개의 지지격자 위치에 부착된 가속도계로부터 취득되었다. 가속도계로 질량이 작은 RION PV-90B 모델을 사용하였다. 가속도계로부터 나온 신호는 B&K사의 Nexus 증폭기와 Breakout Box를 거쳐 HP VXI의 데이터 취득 장비로 디지털 신호화되어 저장된다. HP VXI 데이터 취득 장비의 구동과 데이터 신호 분석은 I-DEAS사의 T-DAS[5] 소프트웨어로 수행되었다. 시험하기 전 부분 연료집합체는 상, 하부 안내관과 상, 하 보조 고정대에 마련된 나사로 체결되어 고정되었다. 이러한 고정 방법은 해석에서 'Fixed-Fixed'로 모사되었다.

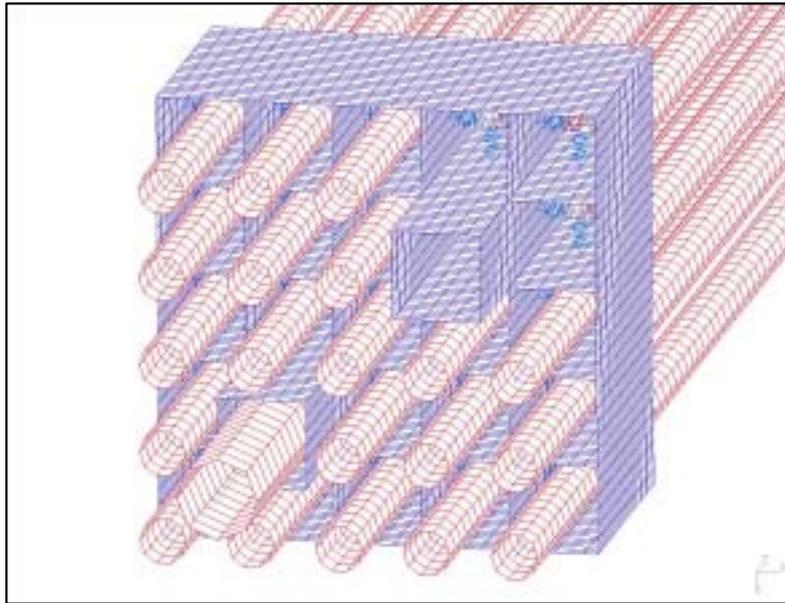


그림 3 H형 부분 연료집합체의 유한요소 모델

2. 본론

(가) 유한요소 해석 결과

유한요소 해석으로 얻은 부분 연료집합체의 1차~6차 고유진동수는 5.1 Hz, 5.1 Hz, 11.5 Hz, 11.5 Hz, 20.1 Hz 및 20.1 Hz 이었다. 그 후 7차 모드부터는 핵연료봉의 진동모드로 믿어지는 유사한 모드 40여개가 27 Hz 근처에 존재하는 것으로 예상되었다. 해석으로 얻은 1차 고유모드를 도시하면 다음의 그림 4와 같다.

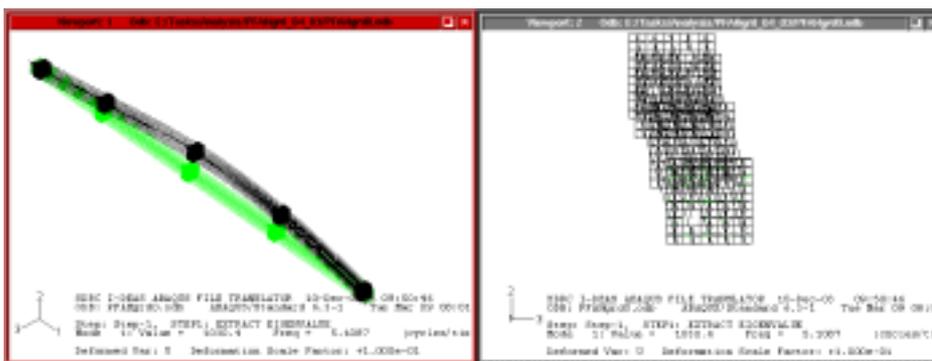


그림 4 H형 지지격자로 구성된 5×5 부분 핵연료집합체의 일차 모드

부분 연료집합체의 1차 모드는 전형적인 보의 일차 굽힘 모드로서 안내관과 연료봉이 상대변위를 일으키지 않고 동일한 방향으로 진동하는 모습을 보여준다. 일차 모드를 상부에서 보면 2-3 평면에서 2축 방향으로 약간 기울어진 방향으로 진동하는 모습을 보여준

다.

부분 연료집합체의 2차 모드를 도시하면 다음의 그림 5와 같다.

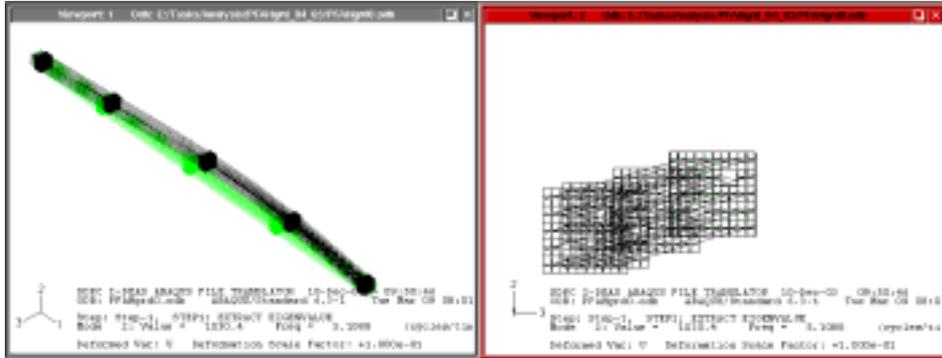


그림 5 H형 지지격자로 구성된 5×5 부분 연료집합체의 이차 모드

2차 모드도 1차 모드와 동일한 보의 일차 굽힘 모드이나 진동이 발생하는 방향이 1차 모드와 90도 다른 평면이었다. 즉 2-3 평면에 3축 방향으로 약간 기울어진 방향으로 진동하는 모습을 보였다.

부분 연료집합체의 3차와 4차 모드는 1차 모드와 2차 모드가 나타나는 순서와 동일하게 90도 방향을 달리한 대각선 방향으로 변위가 발생하지만 길이방향에서 보면 전형적인 보의 2차 모드이다. 이러한 현상은 부분 연료집합체의 단면이 대칭이 아니기 때문에 나타나는 진동특성으로 보인다. 부분 연료집합체의 3차 및 4차 진동모드를 다음의 그림 6 및 그림 7에 도시하였다.

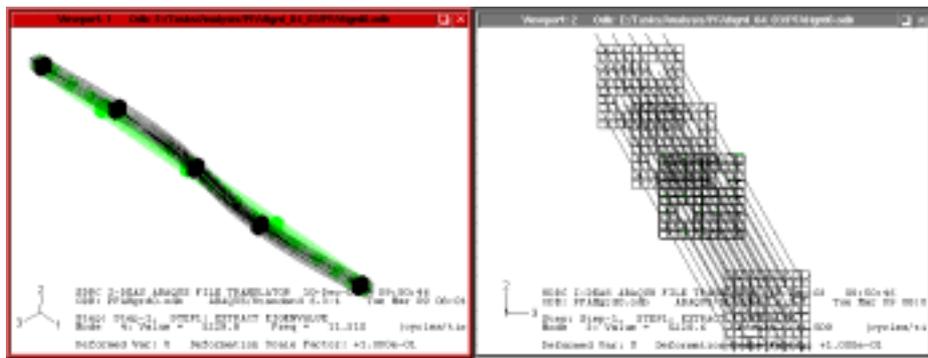


그림 6 H형 지지격자로 구성된 5×5 부분 연료집합체의 삼차 모드

(나) 자유진동 시험 결과

5개의 지지격자체위에 부착한 가속도 신호에서 얻은 주파수 응답 함수와 위상각을 나타내면 다음의 그림 8과 같다.

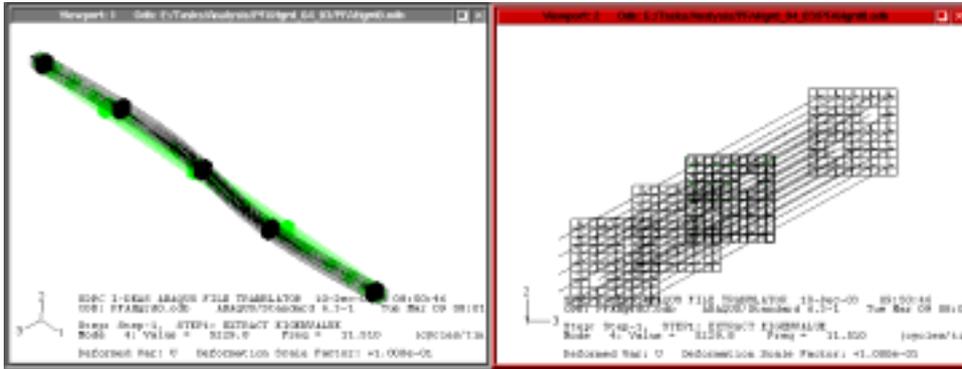


그림 7 H형 지지격자로 구성된 5×5 부분 연료집합체의 삼차 모드

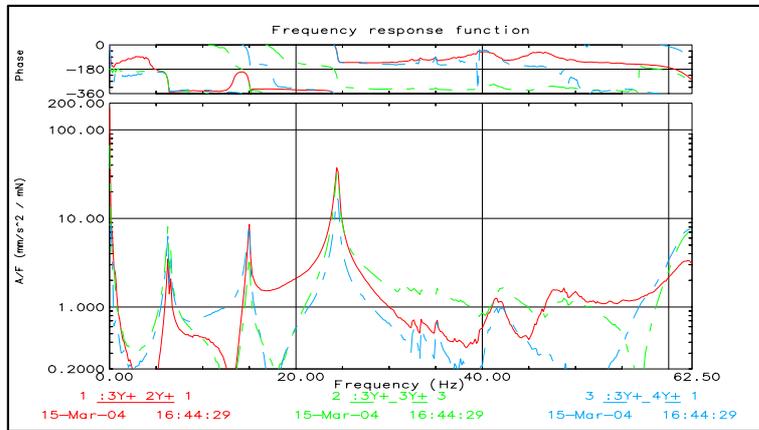


그림 8 시험으로 얻은 주파수 응답 함수와 위상각

진동시험으로 얻은 주파수 응답함수(FRF)를 보면 6.3 Hz, 15.0 Hz 및 24.5 Hz 근처의 신호가 뚜렷하게 나타난다. 이러한 주파수대의 신호를 분석하여 다음의 그림 9~ 11과 같은 진동모드들을 얻을 수 있었다. 그림 9에 도시된 모드는 그림 8의 첫 번째 'PEAK'에 대한 상대변위 정보로서 보의 1차 굽힘 모드이다. 그림 10에 도시된 모드는 앞선 그림 8의 두 번째 'PEAK'으로서 전형적인 보의 2차 굽힘 모드이며, 그림 11은 세 번째 'PEAK'으로 보의 3차 굽힘 모드이다.

시험으로 얻은 1차~3차의 모드는 각 6.3 Hz, 15.0 Hz 및 24.5 Hz 이었다. 이러한 모드는 진동변위로 볼 때 전형적인 보의 1차, 2차 그리고 3차 굽힘 모드로 판단된다. 시험으로 얻은 모드와 유한요소해석으로 얻은 모드는 고유진동수 및 모드형상으로 판단할 때 상호 유사성이 큰 것으로 보인다.

3. 결론

5X5 부분 연료집합체의 진동해석 및 시험을 수행하였다. 유한요소해석으로 얻은 모드들은 부분 연료집합체 단면의 약간 기울어진 축 방향으로 교차되어 나타남을 알았다. 1차 모드는 기울어진 2축 방향으로 나타나며, 2차 모드는 일차모드가 나타난 방향과 90도 돌아간 3축 방향 쪽으로 나타났지만 두 모드는 부분 핵연료집합체의 길이 방향 반파가 나타나는 1차 굽힘 진동모드이었다. 이때 고유진동수는 1 및 2차 공히 5.1 Hz로 예측되었다. 3차 모드는 평면상에서 1차 모드와 동일한 축 방향의 진동변위를, 4차는 2차와 동일한 축방향의 진동변위를 나타내었다. 이러한 두 모드는 보의 2차 모드로 사인 완파를 나타내었고 이때의 고유진동수는 11.5 Hz로 나타났다. 5차와 6차 모드는 앞선 저차 모드와 동일한 축 상의 진동변위를 각각 나타내었고 보의 3차 진동모드를 나타내었으며 고유진동수는 20.1 Hz를 나타내었다.

모달변수를 얻기 위한 시험은 충격해머로 가진하고 5개의 지지격자 위치에 부착한 가속도계로부터 가속도 신호를 얻은 후 이를 분석하는 방법으로 수행되었다. 해석으로 얻은 진동변위가 정확하게 지지격자 면 방향으로 일어나지 않는다는 것을 알았지만 가속도계를 지지격자의 면 방향으로 부착할 수밖에 없었기 때문에 대각선 방향의 신호를 직접 얻을 수는 없었다. 시험으로 얻은 1차, 2차, 3차 고유진동수는 6.3 Hz, 15.0 Hz 및 24.5 Hz 이었다. 1차 ~ 3차 모드의 모드형상은 부분 연료집합체 길이 방향의 전형적인 보 진동모드 형상을 나타내었다. 가속도 신호는 2축 방향과 3축 방향에서 별도로 취득하여 분석하였는데 방향을 달리함에 따른 차이를 나타내지 않았다.

각각의 해석과 시험으로 얻은 결과들은 타당한 것으로 판단되었으며 양 결과 사이에도 상당한 유사성을 발견할 수 있었다. 안내관 슬리브가 있는 경우와 없는 경우에 해석결과와의 차이가 상당함을 지난 연구[2]를 통하여 알게 되었다. 이중관 지지격자체로 구성된 부분 연료집합체의 시험 결과[2]와 금번의 시험결과를 비교해보면 분석상의 오차범위 내에서 일치하였다. 두 개의 지지격자체는 물리적인 특성(무게, 크기 등)이 다를 뿐 아니라 기계적 특성(고유진동수, 굽힘 및 충격강도 등)도 다르기 때문에 유사성이 없다. 그럼에도 불구하고 집합체를 구성한 부분 연료집합체의 진동특성이 동일하게 나타났다는 사실이 흥미롭다. 향후 이러한 원인을 밝히기 위한 연구를 계속 할 예정이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음

4. 참고문헌

- [1] 한국원자력연구소 보고서번호 KAERI/TR-2008/2002, "경수로용 핵연료집합체(5X5)의 진동해석을 위한 유한요소모델 개발," 2002년 1월.
- [2] 강홍석 외 5인, "5×5 부분 핵연료집합체의 진동 해석 및 시험", 한국원자력학회 2003 추계학술대회 발표집.
- [3] SDRC, 2000, I-DEAS Master SeriesTM, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
- [4] Hibbit, H.D., Karlsson, G.I. and Sorensen, E.P., 1999, "ABAQUS/Standard Users Manual", Version 5.8, HKS Inc., RI, USA.
- [5] User's Manual, MTS System Corporation, IDEAS Master Series 7.0., 2000