

## 5X5 부분연료집합체의 진동해석 및 시험

### Vibration Analysis and Test of a 5X5 Partial Fuel Bundle

강홍석, 윤경호, 송기남, 김형규, 최명환, 정연호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

유체유발 진동시험에 사용될 5X5 부분 핵연료집합체의 공기 중 진동해석과 시험을 수행하였다. 부분 핵연료집합체는 실제 경수로 핵연료집합체 길이의 1/2로서 5개의 지지격자체, 23개의 모의 연료봉, 그리고 2개의 안내관으로 구성되었다. 유한요소 해석으로 얻은 1차~3차 고유진동수는 2.65Hz, 4.23Hz, 8.84Hz 이었으나 시험으로 얻은 결과는 6.4Hz, 15.2Hz, 24.0Hz로 나타났다. 이러한 차이는 실제 부분핵연료의 제작과정에서 사용한 안내관 슬리브의 영향으로 집합체의 강성이 예상보다 커졌거나 시험 데이터로부터 저차 모드를 찾아내지 못한 것이 원인인 것으로 판단된다.

#### Abstract

A FE vibration analysis and test in air have been performed for a 5X5 partial Fuel Assembly(FA) that will be used for flow-induced vibration test. The partial FA consists of 5 spacer grids, 23 dummy fuel rods and 2 guide tubes. For the first to third natural frequency, 2.65Hz, 4.23Hz, 8.84Hz are obtained by FE analysis while 6.4Hz, 15.2Hz, 24.0Hz by the modal test. It is judged that the difference between the analysis and test is caused by the existence of two guide tube sleeves or the lower modes that are not identified by the test.

#### 1. 서론

경수로 핵연료집합체의 핵심부품인 지지격자체를 개발하고 있는 원자력연구소는

5X5 크기의 지지격자체와 실제 연료봉의 반 크기인 모의 연료봉 그리고 2개의 안내관으로 구성된 부분 핵연료집합체를 제조하여 유체유발진동 시험을 수행할 예정이다. 유동루프에서 실제 시험을 수행하기 위한 전단계로서 부분 핵연료집합체의 진동특성을 파악하기 위한 해석과 시험을 수행하였다. 부분 핵연료집합체는 제조 중에 설계 변경되어 초기설계를 위해 수행한 진동해석 결과[1]를 그대로 이용할 수 없기 때문에 제조된 상태를 최대한 반영하여 유한요소해석모델을 수정하였다. 초기 설계에 의하면 23개의 모의 연료봉은 납으로 만들어진 펠렛으로 채워질 예정이었으나, 2개의 연료봉에는 특수 가속도계가 장착되도록 설계 변경되었다. 따라서 모의 핵연료집합체에는 밀도가 다른 2종류의 연료봉이 혼재하게 되었다. 또한, 안내관은 지지격자체와 끼워져서 직접 용접되는 방식에서 안내관 슬리브를 매개로 연결되는 방법으로 변경되었다. 이중관 지지격자체로 만들어진 부분 핵연료집합체는 다음의 그림 1과 같다.



그림 1. 5X5 이중관 지지격자체로 만든 부분 핵연료집합체

본 연구를 위한 유한요소해석모델은 초기 설계와 달라진 이러한 부분들이 최대한 반영되도록 수정되었다. 안내관의 직경이 변한 것과 가속도계가 장착된 연료봉에 대한 정보를 해석모델에 반영하는 것은 간단하지만 지지격자와 안내관 슬리브가 용접되고 안내관이 슬리브에 끼워져 용접된 실제 제조상태를 모사하는 것은 용이하지 않다. 본 연구에서 이용한 해석모델은 슬리브가 존재하는 길이(2 cm)에서 슬리브의 두께만큼 안내관의 두께가 두꺼워진 것으로 모사되었다. 유한요소해석모델은 I-DEAS[2]를 이용하여 만들었으나 실제 해석은 모델 파일을 변환하여 ABAQUS[3]로 수행하였다. 유한요소해석에 이용된 부분 핵연료집합체의 재원은 다음의 표와 같다.

표 1 부분 핵연료집합체의 물성치 및 재원

물성치/ 재원		값
모의 연료봉	납봉/빈봉 밀도( $\text{kg}_m/\text{m}^3$ )	39050 / 6600
	내경 (mm)	8.32
	외경 (mm)	9.5
안내관	내경 (mm)	8.32
	외경 (mm)	9.5
안내관 슬리브	내경 (mm)	10.7
	외경 (mm)	9.65
지지격자	판의 두께 X 높이 (mm)	.475 X 35
	스프링 상수 (N/mm)	200
공통사항	프와송의 비	0.294
	영의 계수 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	10.8E10

유한요소해석모델에서 지지격자는 요소의 길이가 6.4 mm 인 3차원 beam 요소로, 그리고 지지격자 스프링은 2차원 스프링요소(2-D SPRINGA)로 모델링되었다. 지지격자 단일 셀내에는 사방 4개의 스프링이 존재한다고 가정되었다. 연료봉은 3차원 파이프(3-D PIPE)요소로 모델링되었는데 하나의 연료봉은 96개의 요소로 분할되었다. 안내관은 102개의 3차원 파이프 요소(3-D PIPE)로 모델링 되었고, 지지격자와는 슬리브를 매개로 완전히 연결(MPC: Multi-Point Constraint)된 것으로 가정되었다. 안내관의 길이방향으로 배열되는 지지격자체는 5개이며 지지격자체와 지지격자체 사이의 간격은, 지금까지 당 연구소에서 연료봉의 진동연구에 사용하던 모델과 동일하게, 3 균데는 564 mm, 그리고 최하단 한 곳은 400 mm로 설정되었다.

모달변수(고유진동수 및 모드형상)를 얻기 위한 시험으로 충격해머로 가진하고 가속도계로 진동신호를 취득한 후 분석하는 전형적인 모달시험 방법을 채택하였다. 가속도 신호는 5개의 지지격자 위치에 부착된 가속도계로부터 취득되었다. 가속도계로 질량이 작은 RION PV-90B 모델을 사용하였다. 가속도계로부터 나온 신호는 B&K사의 Nexus 증폭기

와 Breakout Box를 거쳐 HP VXI의 데이터 취득 장비로 디지털 신호화되어 저장된다. HP VXI 데이터 취득 장비의 구동과 데이터 신호 분석은 I-DEAS사의 T-DAS[4] 소프트웨어로 수행되었다. 시험하기 전 부분 핵연료집합체는 상, 하부 안내관과 상, 하 보조 고정대에 마련된 나사로 체결되어 그림 1과 같이 고정되었다. 이러한 고정 방법은 해석에서 'Fixed-Fixed'로 모사되었다.

## 2. 본론

### (가) 유한요소 해석 결과

유한요소 해석으로 얻은 부분 핵연료집합체의 1차~6차 고유진동수는 2.65Hz, 4.23Hz, 8.84Hz, 10.29Hz, 18.68Hz 및 19.28Hz 이었다. 그 후 7차 모드부터는 핵연료봉의 모드로 믿어지는 고유진동수가 27Hz 근처에서 약 40여개 몰려있다. 해석으로 얻은 1차 고유모드를 도시하면 다음의 그림 2와 같다.

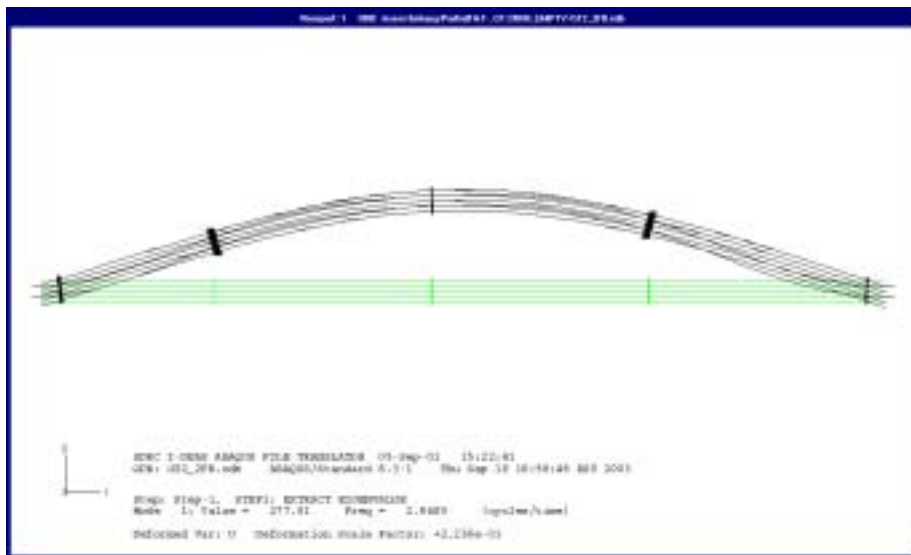


그림 2 5X5 모의 핵연료집합체의 1차 고유진동 모드

부분 핵연료집합체의 1차 모드는 전형적인 보의 일차 굽힘 모드로서 안내관과 연료봉이 동일한 방향으로 변형되는 모습을 보여준다. 일차 모드를 상부에서 보면 2-3 평면에서 대각선 방향으로 변형되는 모습을 보여준다. 이러한 변형모양을 변형전 핵연료와 함께 도시하면 다음의 그림 3과 같다. 그림3에서 보이는 바와 같이 가속도계가 설치될 빈 연료봉 하나와 두개의 안내관의 중심을 관통하는 축을 중심으로 90도 돌아간 방향으로 진동 변위가 발생함을 알 수 있다.

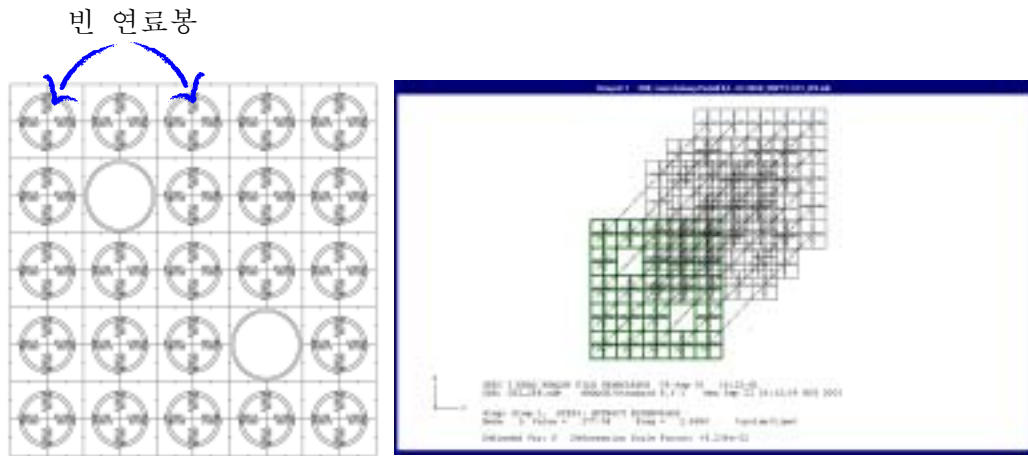


그림 3 부분 핵연료집합체의 1차 모드(평면도)

부분 핵연료집합체의 2차 모드를 도시하면 다음의 그림 4와 같다. 2차 모드도 1차 모드와 동일하게 보의 굽힘모드이나 변위가 발생하는 방향이 1차 모드와 90도 다른 평면이었다. 즉 1차 모드와 2차 모드는 방향을 달리하는 보의 1차 굽힘모드로서 안내관, 빈연료봉 그리고 납으로 채워진 연료봉 모두가 하나의 몸체로 움직이는 집합체 모드이었다. 이렇게 1차 모드와 다른 대각선 방향으로 움직이는 형상을 다음의 그림 5에 도시한다.

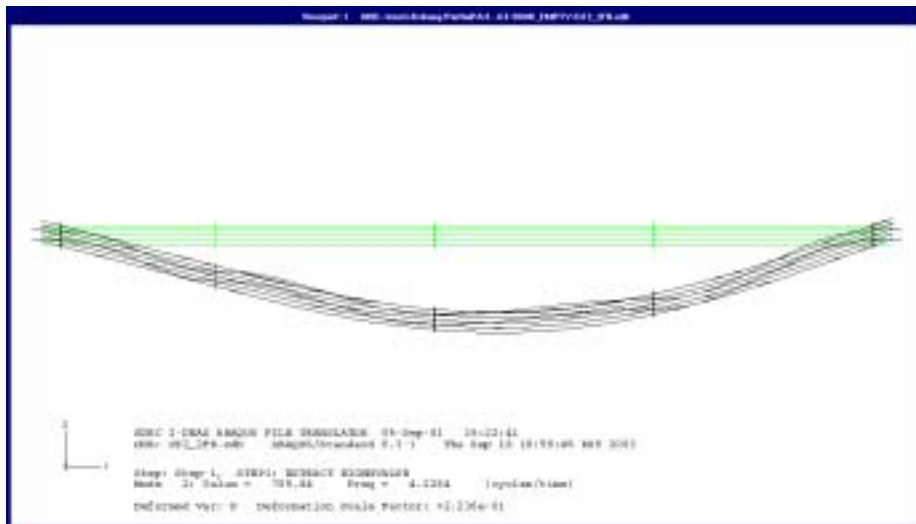


그림 4 5X5 모의 핵연료집합체의 2차 진동 모드

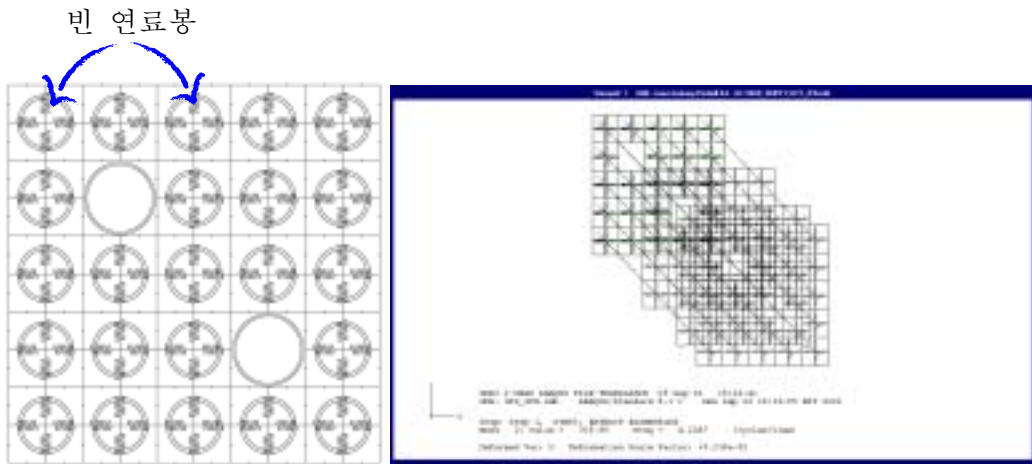


그림 5 5X5 모의 핵연료집합체의 2차 진동 모드(평면도)

부분 핵연료집합체의 3차와 4차 모드는 1차 모드와 2차 모드가 나타나는 순서와 동일하게 90도 방향을 달리한 대각선 방향으로 변위가 발생하는 일반적인 보의 2차 모드이다. 이러한 현상은 단면이 대칭이 아닌 부분핵연료집합체에 나타나는 진동특성이다. 부분핵연료집합체의 3차 및 4차 진동모드를 다음의 그림 6 및 그림 7에 도시하였다.

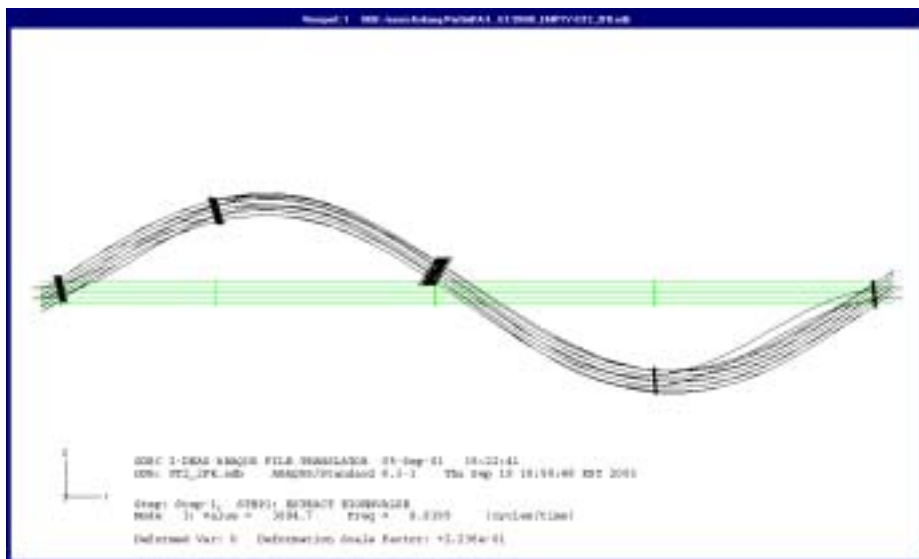


그림 6 5X5 모의 핵연료집합체의 3차 고유진동 모드

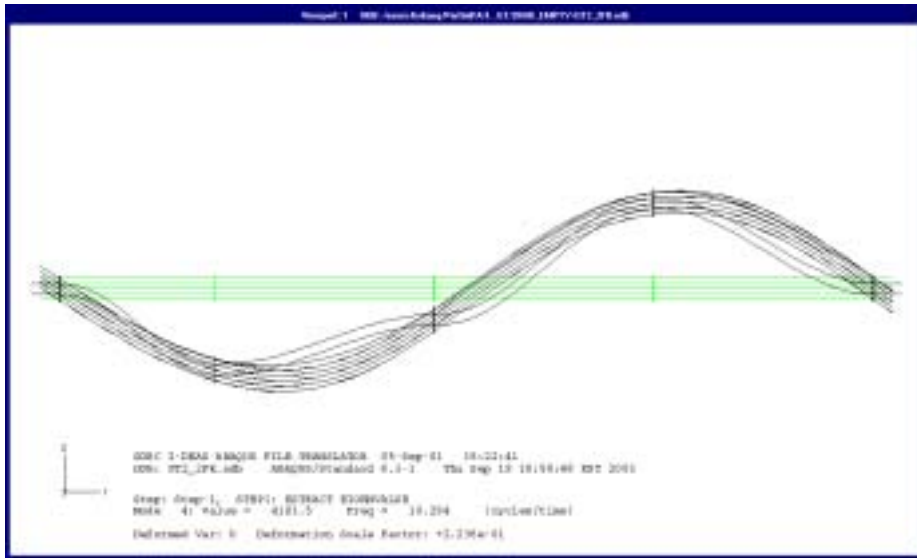


그림 7 5X5 모의 핵연료집합체의 4차 고유진동 모드

(나) 자유진동 시험 결과

5개의 지지격자체위에 부착한 가속도 신호에서 얻은 주파수 응답 함수와 위상각을 나타내면 다음의 그림8과 같다.

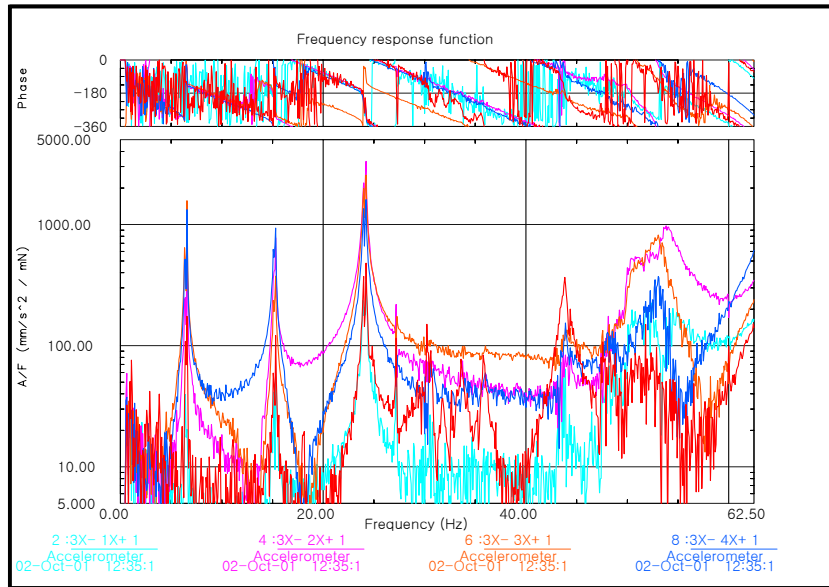


그림 8 모의 핵연료집합체의 주파수 응답함수와 위상각

그림 8의 신호는 그림3의 2축 방향(상하방향)에 설치한 가속도계로부터 얻은 것이다. 진동시험으로 얻은 주파수 응답함수(FRF)를 보면 6.4Hz, 15.2Hz 및 24.0Hz 근처의 신호가 뚜렷하게 나타난다. 이 신호들의 실수부와 허수부를 도시하면 다음의 그림 9와 같다.

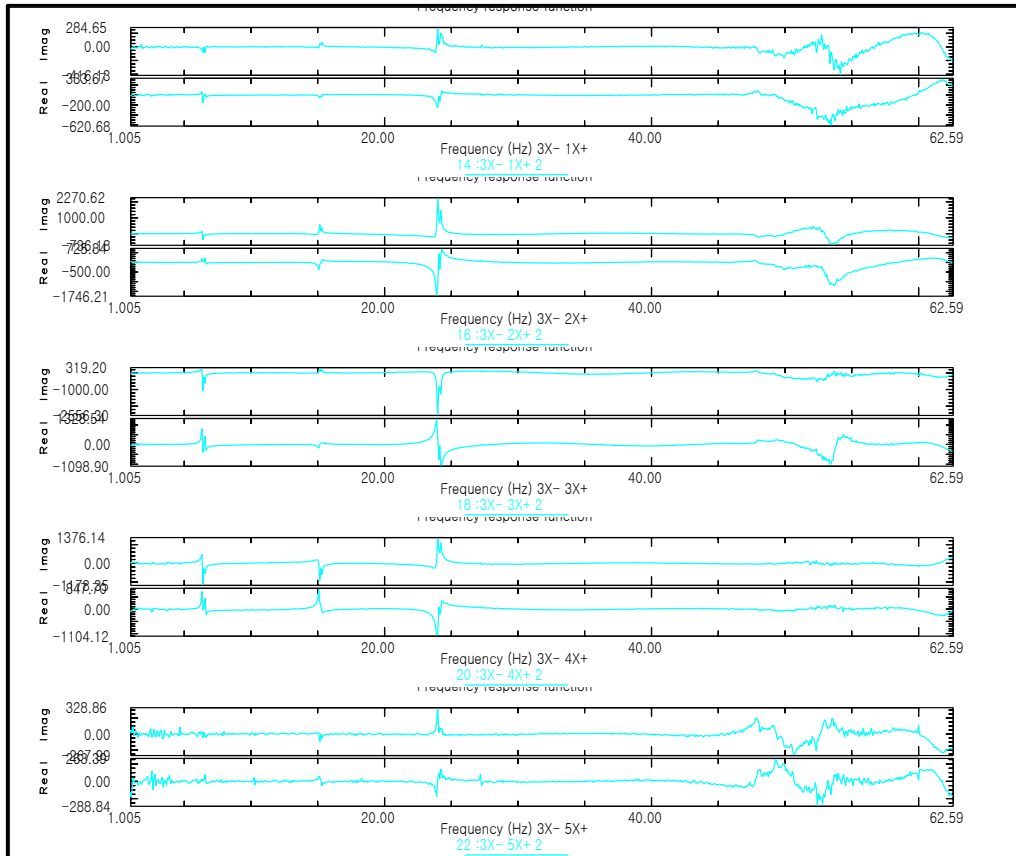


그림 9 모의 핵연료집합체의 모드시험으로 얻은 실수부와 허수부

주파수 응답함수와 같이 동일한 주파수대에서 'PEAK'이 나타남을 확인하였다. 이러한 주파수대의 신호를 분석하여 다음의 그림 10~ 12와 같은 진동모드들을 얻을 수 있었다. 그림 10에 도시된 모드는 그림 8 및 9의 첫 번째 'PEAK'에 대한 상대변위 정보로서 보의 1차 굽힘 모드이다. 그림 11에 도시된 모드는 앞선 그림 8 및 9의 두 번째 'PEAK'으로서 전형적인 보의 2차 굽힘 모드이며, 그림 12는 세 번째 'PEAK'으로 보의 3차 굽힘 모드이다.

시험으로 얻은 1차~3차의 모드는 각 6.4Hz, 15.2Hz 및 24.0Hz 이었다. 이러한 모드는 진동변위로 볼 때 전형적인 보의 1차, 2차 그리고 3차 굽힘 모드로 판단된다. 이러한 모드들은 유한요소해석으로 얻은 고유진동수와 상당한 차이를 보였다.





그림 10 시험으로 얻은 1차 진동 모드



그림 11 시험으로 얻은 2차 진동 모드



그림 12 시험으로 얻은 1차 진동 모드

### 3. 결론

5X5 부분 핵연료집합체의 진동해석 및 시험을 수행하였다. 유한요소해석으로 얻은 모드들은 부분 핵연료집합체 단면의 대각선으로 교차되어 나타남을 알았다. 1차 모드는 두개의 안내관과 모서리에 위치한 1개의 빈 핵연료봉을 연결하는 대각선 축을 중심으로 진동하였으며 2차 모드는 1차 모드와 90도 돌아간 대각선 축을 중심으로 진동함을 알 수 있었다. 부분핵연료집합체를 길이가 긴 보로 볼 때 1차 모드와 2차 모드는 길이방향으로 1차 굽힘 진동모드이며 1차가 2.65Hz 그리고 2차가 4.23Hz의 고유진동수를 나타내었다. 3차 모드는 다시 1차 모드와 동일한 축 상의 진동변위를, 4차는 2차와 동일한 축 상의 진동변위를 나타내었다. 이러한 두 모드는 보의 2차 모드로 완전한 사인 완파를 나타내었다. 5차와 6차 모드는 앞선 저차 모드와 동일한 축 상의 진동변위를 각각 나타내었고 보의 3차 진동모드를 나타내었다. 결론적으로 1, 3, 5차 모드와 2, 4, 6차 모드는 각각 동일한 대각선 축을 기준으로 진동하며 이들은 각각의 축에 대하여 보의 1차, 2차, 3차 진동 모드로 나타났다.

모달변수를 얻기위한 시험은 충격해머로 가진하고 5개의 지지격자 위치에 부착한 가속도계로부터 가속도 신호를 얻은 후 이를 분석하는 방법으로 수행되었다. 해석으로 얻은 진동변위가 대각선 방향으로 일어남을 알았지만 가속도계를 지지격자의 면 방향으로 부착할 수밖에 없었기 때문에 대각선 방향의 신호를 직접 얻을 수는 없었다. 시험으로 얻은 1차, 2차, 3차 고유진동수는 6.4Hz, 15.2Hz 및 24.0Hz 이었다. 1차 ~ 3차 모드의 모드형상은 부분 핵연료집합체 길이 방향의 전형적인 보 진동모드를 나타내었다. 1차 모드 이하의 저 주파 대역의 신호는 뚜렷한 모드신호의 특성을 나타내지 않았다.

해석과 시험으로 얻은 결과 각각은 타당한 것으로 판단되었지만 양 결과의 비교 유사성을 찾을 수 없었다. 이러한 비유사성의 원인이 무엇인지 현재까지 알 수 없지만 안내관 슬리브와 지지격자체 그리고 안내관 슬리브와 안내관의 접촉을 모사한 해석방법에서 문제가 발생했거나, 저주파수 대역의 신호분석이 잘못되었거나, 혹은 시험방법 자체의 문제인 것으로 판단하고 있다. 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] SDRC, 2000, I-DEAS Master Series<sup>TM</sup>, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
- [3] Hibbit, H.D., Karlsson, G.I. and Sorensen, E.P., 1999, "ABAQUS/Standard Users Manual", Version 5.8, HKS Inc., RI, USA.
- [4] User's Manual, MTS System Corporation, IDEAS Master Series 7.0., 2000