2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

5´5 부분 핵연료집합체의 유한요소 진동해석
FE Vibration Analysis on a 5´5 Partial Fuel Assembly

강흥석, 윤경호, 김형규, 송기남, 정연호
대전광역시 유성구 덕진동 150 한국원자력연구소 핵연제조기술개발
hskang@nanum.kaweri.re.kr

요 약

5 개의 지지격자와 25 개의 모의 연료봉으로 구성된 5×5 부분 핵연료집합체의 유한요소진동해석을 수행하였다. 길이 2.2 m, 직경 9.5 mm 인 모의 연료봉은 12.8 mm 의 피치로 배열되었다고 가정하였으며, 25 개의 연료봉 중 하나에서 4 개는 안내관으로서 5 개의 지지격자와 용접되어 실제적인 구조강도를 담당한다고 가정하였다. 안내관을 제외한 모의 연료봉은 5 개의 지지격자에 있는 스프링으로 연속 지지되는 보로 가정되었다. ABAQUS 코드로 계산된 진동해석 결과 저차 6 개 모드는 전체 부분집합체의 보 진동모드로 확인되었으며, 안내관이 하나인 부분집합체의 일차고유진동수는 2.07 Hz 이었고, 안내관이 4 개인 경우는 4.92 Hz 이었다. 최저차 6 개의 집합체 진동모드 후에 모의 연료봉과 연성된 진동모드가 수개 나타나다가, 고유진동수 26.6 Hz 근방에서 순수한 모의 연료봉의 일차 진동모드가 나타났다. 부분집합체 해석으로 추출된 연료봉의 진동모드는 단일 연료봉 해석으로 얻은 진동모드와 일치되는 모드이었다.

Abstract

A free vibration analysis is performed by ABAQUS computer code for a 5×5 partial fuel assembly consisted of 25 dummy rods and 5 spacer girds. The rods of 2.2 m tall and 9.5 mm diameter are diametrically arranged in 12.8 mm of the pitch. One to four rod(s) among the 25 rods is(are) assumed as guide tube(s) which is(are) welded to five spacer girds for constructing the skeleton of the partial fuel assembly. Rests of the rods are inserted into the skeleton to be supported by four springs attached on the spacer grids at five points along the rod length. It is resulted that lower 6 modes are associated with the pure assembly vibration modes, what is called beam modes, and the fundamental mode is calculated at 2.07 Hz for one guide tube while at 4.92 Hz for four guide tubes. A few modes that are appeared just after pure assembly vibration modes are believed to be the modes coupled with the single rod vibration mode. The fundamental mode of the rod is calculated at 26.63 Hz to 26.64 Hz no matter how many the guide tubes are. Not only the natural frequency but also the mode shape is the same as one obtained from the single rod analysis.

1. 서론

우리나라 뿐 아니라 세계적인 유수의 핵연료회사에서도 핵연료집합체를 설계하거나 핵연료집합체가 존재하는 원자로의 냉각수 상실사고(Loss of Coolant Accident) 등을 유한요소법으로 해석할 때 크게 두 가지 방법으로 핵연료집합체를 모델링하고 있다. 첫째, 핵연료를 하나의 보로 모사하는 개략적(coarse)인 모델링 방법이 있고, 둘째, 모든 핵연료봉을 대표하도록 물성을 맞춘 연료봉 2 개를 지지격자와 마찰 요소로 연결시킨, 다소 자세한 모델링 방법이 있다. 어느 경우에서나 단면이 사각형인 핵연료의 면 방향으로 좌표축을 설정하고 설정된 축 방향으로 대칭성을 부여한다. 예를 들어 내진이 발생하여 핵연료가 진동을 한다고 할 때 설정된 축 방향으로 진동변위가 발생한다고 가정하고 2 차원으로 해석한다. 이러한 가정은 사실 상당한 타당성을 갖는다고 볼 수 있지만 핵연료의 진동모드가 설정된 두 축 사이로, 즉 대각선 방향으로 발생한다면 지금까지 해왔던 2 차원 해석모델로는 이를 확인할 방법이 없다.

한편 원자로내 핵연료집합체의 핵연료봉은 지지격자 스프링으로 연속 지지되는 형태로 연소되는데 봉 주위를 빠르게 지나가는 냉각수의 유동으로 진동(유체유발진동)이 발생하게 된다. 핵연료봉에 발생하는 이러한 진동에 의해 핵연료봉과 지지격자 스프링 혹은 핵연료봉과 딤플 사이에 상대운동이 발생하게 되고 이러한 상대운동에 의해 크던 작던 프레팅 마멸현상이 생기게 되며, 아주 드물게는 핵연료봉이 손상되기도 한다. 이러한 프레팅 마멸현상은 스프링으로 지지된 핵연료봉의 진동에 기인하기 때문에 이를 연구하기 위해서는 핵연료봉의 유체유발진동 연구가 선행되어야 한다. 핵연료봉에 발생하는 유체유발진동 현상은 고유진동 특성을 갖는 보에 발생하는 힘기인 진동현상으로 가정할 수 있기 때문에 지금까지 단일 연료봉으로 관심영역을 좁히고 연구가 진행되어 왔다. 그렇지만 엄밀히 핵연료봉은 다발로 묶여서 하나의 집합체를 이루기 때문에 전체 핵연료집합체의 진동현상으로부터 단일 핵연료봉의 진동현상을 분리하여 독립적으로 모델링하는 것이 가능한 지의 여부도 확인이 필요한 사항이다.

원자력연구소의 고성능지지격자구조기술개발과제는 가압경수로형 핵연료집합체 지지격자의 개발과 이와 관련된 기반기술연구를 수행하고 있다. 지금까지 과제를 수행하면서 7 종의 지지격자를 개발하여 국내외에 특허 출원하였고, 시편을 제조하여 관련 시험도 수행하고 있다. 이러한 시험의 일환으로 5×5 부분 핵연료집합체에 대한 유체유발진동시험을 계획 중에 있어서 개발된 지지격자 중 2 종의 지지격자로 구성되는 부분 핵연료집합체를 제작할 예정이다. 이러한 부분 핵연료집합체를 제조하기 위한 사전 준비 작업으로 먼저 안내관의 개수와 위치를 결정해야 한다. 그런데 부분 집합체 내 안내관의 위치와 개수에 따라 부분 집합체의 진동 특성이 변하게 될 것이므로 실제 부분 집합체를 제조하기 전에 안내관의 개수 및 위치에 따른 부분 집합체의 진동특성을 파악할 필요가 있다.

현재 계획중인 부분 핵연료집합체는 5개의 지지격자와 외경 9.5 mm, 길이 약 2.2 m 크기의 모의 연료봉, 그리고 외경 12.24 mm의 안내관으로 구성될 예정이다. 본 연구에서는 안내관의 개수를 1개, 2개, 및 4개로 변화 시키면서 부분집합체의 진동 특성을 파악하고자 하였다. 5×5 부분 핵연료집합체는 3차원 해석이 가능하고 전체 집합체로 결과로부터 핵연료봉의 결과만을 분리할 수 있도록 모델링하였다.

2. 유한요소해석 모델

부분 핵연료집합체는 먼저 IDEAS[1] 소프트웨어의 MASTER MODLER 모듈을 이용하여 3차원 모델로 만들어진 후, 유한요소해석 프로그램으로 유명한 ABAQUS[2] 컴퓨터 코드 파일로 변환되어 고유진동수와 고유모드가 계산되었다. 안내관이 2개인 부분 집합체의 3차원 유한요소모델은 다음의 그림 1과 같다. 지지격자판은 두께가 0.457 mm 높이가 35 mm의 지르칼로이 판으로 만들어진다. 유한요소모델에서 지지격자는 요소 하나의 길이가 6.4 mm 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 완전히 접촉되어 연결되어 있다고 가정되었다. 안내관의 길이방향으로 배열되는 지지격자는 5개로 부분 집합체를 구성하되, 지지격자와 지지격자 간의 간격은 지금까지 당 연구소에서 연료봉의 진동시험 및 연구에 사용하던 모델을 수용하여 3군데는 564 mm, 그리고 한 군데는 400 mm로 설정하였다. 유한요소해석모델을 만드는데 사용한 재료의 물성치와 재원은 다음의 표 1과 같다.

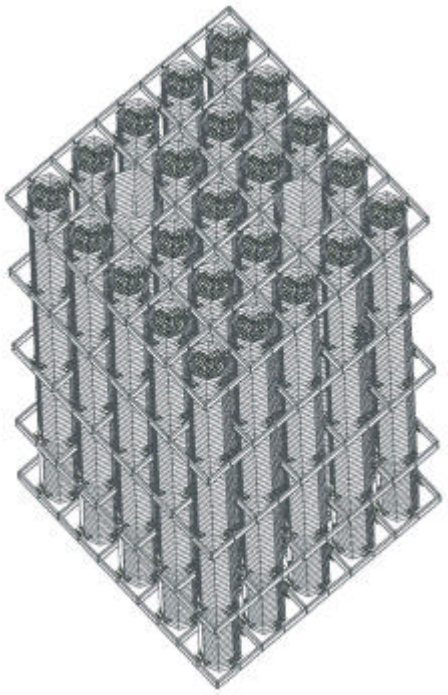


그림 1 5´5 부분 핵연료집합체의 유한요소해석모델

표 1 5´5 부분 핵연료집합체 부품의 재원 및 물성치

물성치/재원		값
모의 연료봉	밀도 (kg_m/m^3)	39050
	내경 (mm)	8.32
	외경 (mm)	9.5
안내관	내경 (mm)	11.4
	외경 (mm)	12.24
지지격자	밀도 (kg_m/m^3)	6550
	판의 두께×높이(mm)	.457×35
	스프링 상수(N/mm)	200
공통 사항	프와송의 비	0.294
	영의 계수(N/m^2)	10.5E10

3. 계산결과 및 토의

(1) 단일 연료봉의 진동해석

스프링으로 연속 지지된 단일 연료봉의 진동해석 및 시험에 관한 연구[3~4]에 의하면 지지되는 스프링의 강성과 스프링-딤플 혹은 스프링-스프링 등과 같은 지지방법에 따라 연료봉의 진동특성이 크게 변한다. 이러한 지지스프링의 강성이나 지지방법에 대한 차이를 보기 위한 것이 아닌 본 연구에서는 지지격자 셀의 한면에 1 개의 스프링이 존재하여 전체적으로 단일 셀 당 4개의 스프링으로 연료봉을 지지한다고 가정하였다.

계산된 단일 연료봉에 대한 고유진동수와 고유모드를 5차까지 나타내면 다음의 그림 2와 같다.

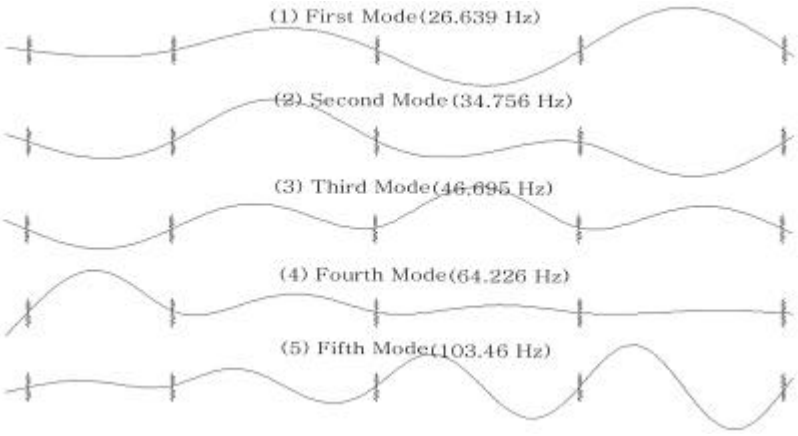


그림 2 지지격자 스프링으로 연속 지지된 단일 연료봉의 고유모드 및 고유진동수

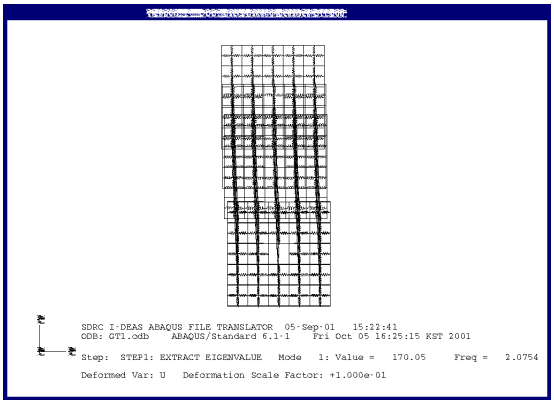
일차 고유진동수로부터 사차 고유진동수는 26 Hz에서 64 Hz까지 좁은 범위의 주파수 영역에서 나타났으며, 5차 고유진동수는 103 Hz 근처로 계산되었다. 고유모드형상은 참고문헌 [3,4]에 나타난 모드형상과 유사한 것으로 나타났다.

(2) 안내관이 하나인 부분 핵연료집합체의 진동해석

중앙에 하나의 안내관을 배치한 부분 핵연료집합체의 진동해석으로 얻어진 고유진동수를 48차까지 정리하면 다음의 표 2와 같다. 안내관을 중앙에 하나 배치한 경우 부분 집합체의 단면은 설정된 축에 대칭이 되기 때문에 동일한 진동모드가 축을 달리하여 두 개씩 쌍으로 나오게 된다. 1차 및 2차 고유진동수는 2.0754 Hz로 계산되었으며 3차 및 4차 고유진동수는 7.54 Hz로 나타났다. 5차 및 6차 고유진동수도 동일한 모드로 16.334 Hz로 계산되었다. 6차 모드까지 살펴보면 부분 집합체의 보 진동모드로서 일차 고유모드(실제로 1차 및 2차 모드)에서 길이방향으로 반파가 나타나고, 이차 고유모드(실제로 3차 및 4차 모드)에서 완파가 나타나며, 3차 모드(실제로 5차 및 6차 모드)에서 하나의 완파와 반파가 나타남을 알 수 있었다. 다음의 그림 3에서부터 그림 5에 걸쳐서 부분 핵연료집합체의 전체 보 진동 모드 중 1차(실제는 1차와 2차)에서 3차(실제는 5차와 6차)까지 모드형상을 나타내었다. 그림의 상단에 있는 것은 그 진동모드가 발생하는 부분 집합체의 평면도를 나타내며, 가운데 그림은 삼차원으로 표시된 정면도이다.

표 2 안내관이 하나인 5′5 부분 핵연료집합체의 고유진동수

Mode No.	고유 진동수(Hz)	Mode No.	고유 진동수(Hz)
1~2	2.0754	22	26.636
3~4	7.5403	23	26.637
5~6	16.334	24~27	26.637
7	25.488	28	26.638
8	26.406	29	26.638
9	26.509	30	26.639
10	26.509	31	26.639
11	26.622	32	26.640
12	26.623	33	26.640
13	26.626	34	26.640
14	26.626	35	26.640
15	26.632	36	26.640
16	26.632	37	26.642
17	26.633	38	26.642
18	26.633	39	26.642
19	26.635	40	26.642
20	26.635	41~44	26.643
21	26.636	45~48	26.644



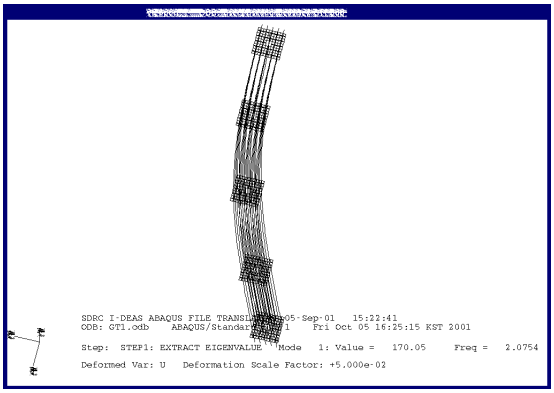
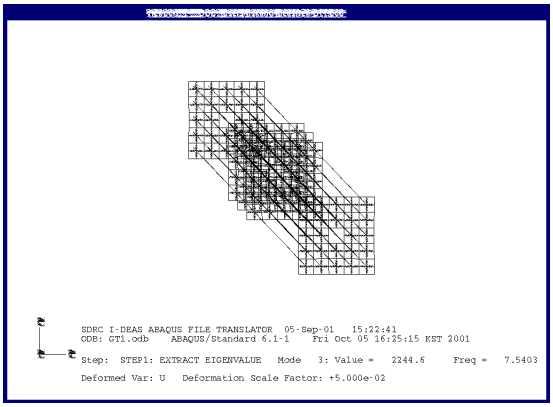


그림 3 안내관이 하나인 5′5 부분 핵연료 집합체의 1차 진동모드



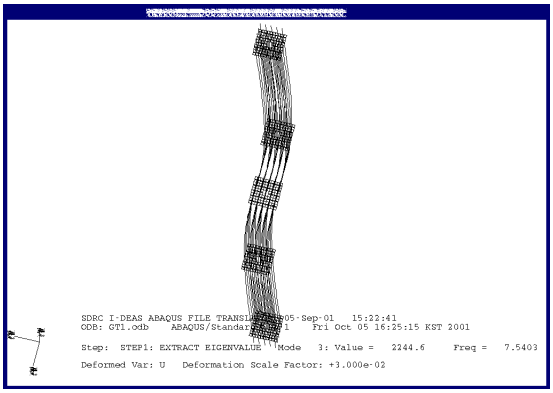
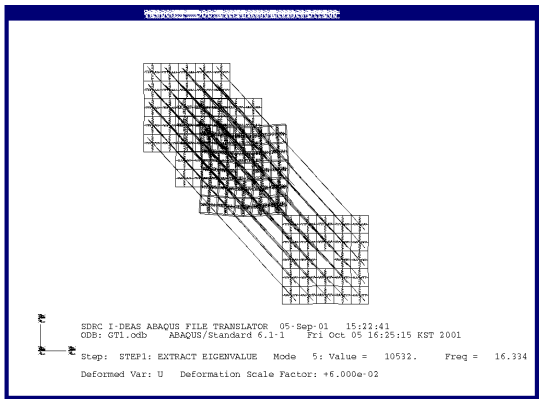


그림 4 안내관이 하나인 5′5 부분 핵연료 집합체의 3차 진동모드



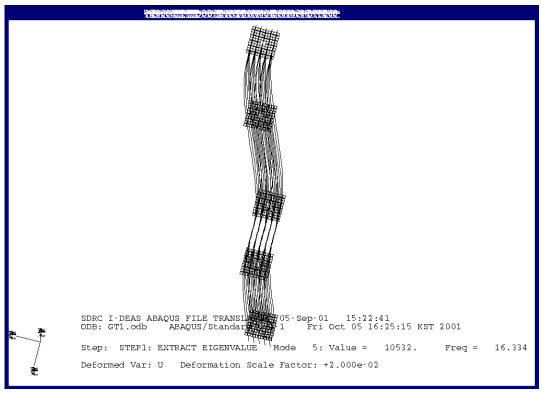
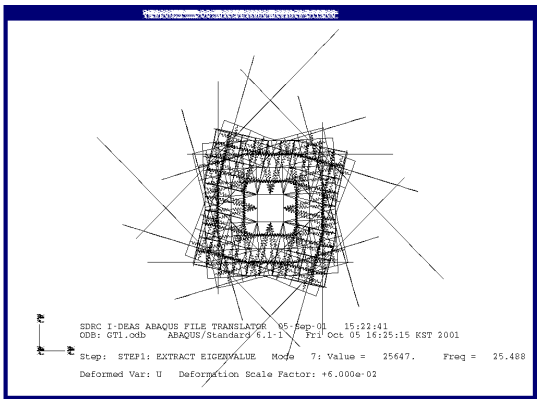


그림 5 안내관이 하나인 5´5 부분 핵연료 집합체의 5차 모드



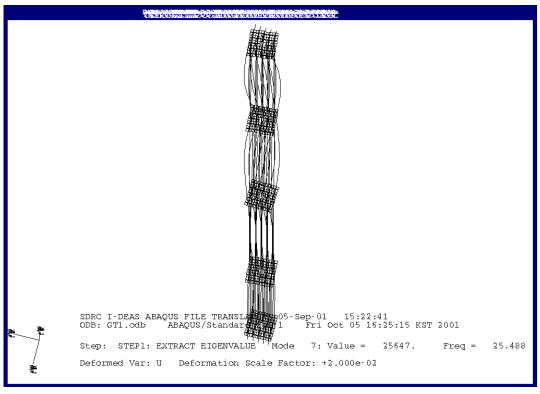


그림 6 안내관이 하나인 5´5 부분 핵연료 집합체의 7차 모드

특이한 것은 부분 집합체의 3차 모드에서 진동 변위가 발생하는 방향이 설정된 축(단면의 면방향)의 대각선 방향으로 발생한다는 것이다.

7차 모드에서 10차 모드까지는 부분집합체의 진동모드와 단일 연료봉의 진동모드가 연성(coupling)되어 나타나는 모드로서 부분집합체의 회전모드와 연료봉의 1차 모드가 연성되어 복잡한 진동현상이 나타났다. 이러한 연성모드 중 대표적인 모드인 7차 모드를 그림 6에 도시하였다. 그림 6의 평면도 중 선으로 나타나는 것은 연료봉으로서 전혀 진동을 하지않으면 평면에서 점으로 나타나며 상대진동변위가 클수록 선의 길이가 크게 나타난다. 그림 6의 평면도에서 보는 바와 같이 7 차 모드는 부분 집합체의 회전 모드와 연료봉의 진동모드가 연성되어 나타나는 모드이다.

부분 핵연료집합체의 11차 고유진동수는 단일 연료봉 해석에서 나타나는 1차 고유진동수와 거의 동일한 값으로서 모드 형상을 비교해 보아도 지지격자나 안내관의 변위가 전혀 나타나지않는 완전한 연료봉의 1차 모드로 판단되었다. 실제적으로 연료봉의 1차 모드는 부분 집합체의 11차 모드에서 시작하여 계산으로 얻은 48차 모드까지 계속 반복하여 나타났다.

(3) 안내관이 네 개인 부분 핵연료집합체의 진동해석

네 개의 안내관을 단면에 대칭으로 배열한 부분 핵연료집합체의 고유진동해석으로 얻은 결과를 정리하면 다음의 표 3과 같다. 안내관이 하나인 경우와 동일하게 단면형상이 설정된 축에 대칭이기 때문에 집합체의 동일한 진동모드가 축을 달리하여 쌍으로 나타났다. 집합체의

1차에서 5차까지의 보 진동모드를 그림 7에서 9에 도시하였다.

표 3 안내관이 네 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 고유진동수

Mode No.	고유 진동수(Hz)	Mode No.	고유 진동수(Hz)
1 ~ 2	4.9224	3 ~ 4	4.9224
5	19.358	6	19.358
7	26.434	8	26.523
9	26.610	10	26.610
11	26.623	12	26.626
13	26.634	14	26.634
15	26.634	16	26.635
17	26.635	18	26.635
19 ~ 22	26.637	23 ~ 26	26.638
27 ~ 30	26.640	31 ~ 36	26.642
37 ~ 39	26.643	40 ~ 46	26.644
47	30.047	48	30.048
49	33.453	50	34.053

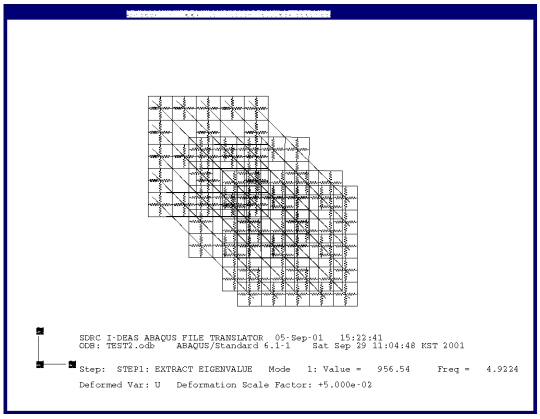


그림 7 안내관이 네개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 1차 모드

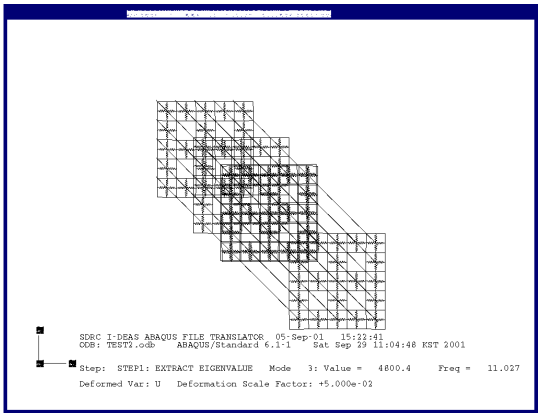


그림 8 안내관이 네개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 3차 모드

안내관이 네개인 핵연료집합체의 1차 고유진동수는 안내관이 하나인 경우에 비하여 상당히 큰 4.92 Hz로 나타났다. 안내관이 지지격자에 고정되어 부분집합체의 강성을 크게 하기 때문에 안내관의 개수가 늘어남에 따라 고유진동수가 커지는 것은 당연하다. 안내관이 네 개인 경우 집합체의 진동 방향은 설정된 두 축 'Y' 및 'Z' 의 대각선 방향으로 발생하였다.

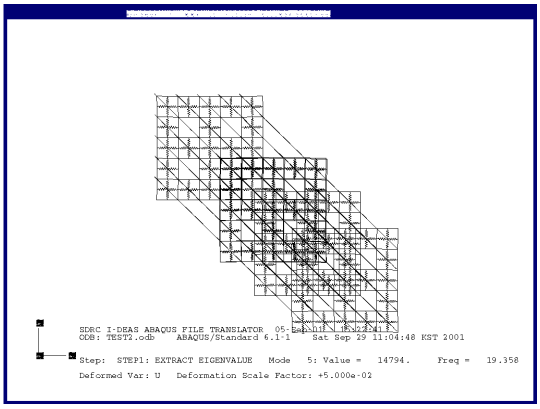


그림 9 안내관이 네개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 5차 모드

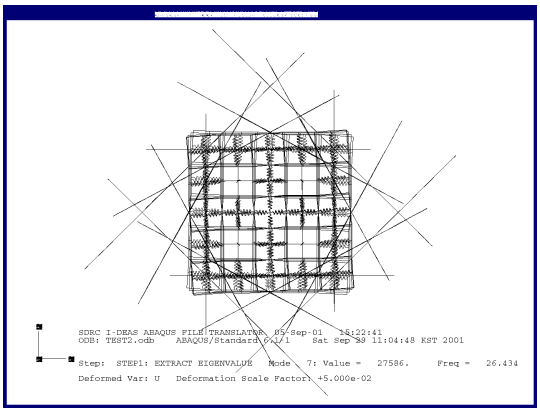


그림 10 안내관이 네개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 7차 모드

이렇게 두 축의 대각선 방향으로 진동모드가 나타나는 것은 안내관의 관성 모우먼트(Moment of inertia)가 봉의 관성 모우먼트에 비하여 크고 부분집합체의 강성을 보강하는 힘이 크기 때문인데, 대각선 방향 축을 기준으로 잡았을 때 안내관 2개 만이 강성에 영향을 주지만 설정된 축 방향으로는 안내관 4개가 강성에 영향을 주기 때문에 상대적으로 축 방향의 강성이 크고, 따라서 집합체의 진동 모드에서는 설정된 두 축의 대각선 방향으로 진동변위가 발생하는 것으로 보인다. 고유진동수가 26.43 Hz인 7차 모드는 집합체의 회전모드와 연료봉의 진동모드가 연성되어 나타나는 모드로 판단된다. 그림 10에 7차 모드 형상을 도시하였다. 이러한 집합체와 연료봉이 연성되는 진동모드는 12차 모드까지 이어졌고 13차 모드에서 46차 모드까지 순수한 연료봉의 1차 진동모드가 나타나는 구간으로 판단되었다. 47차 모드부터 다시 부분집합체의 진동모드가 나타나기 시작하였는데, 47차 모드와 48차 모드는 집합체의 진동모드와 연료봉의 1차 모드가 연성된 것으로 보이며 49차 및 50차 모드는 집합체의 진동모드와 연료봉의 2차 모드가 연성되는 것으로 나타났다.

(3) 안내관이 두 개인 부분 핵연료집합체의 진동해석

중앙에 두개의 안내관(GT)을 배치하는 경우 설정된 ‘Y’ 및 ‘Z’ 축을 기준으로 부분집합체의 단면에 대칭성을 부여할 수 없기 때문에 결국 다음의 그림 11과 같이 비대칭으로 안내관을 배열하였다.

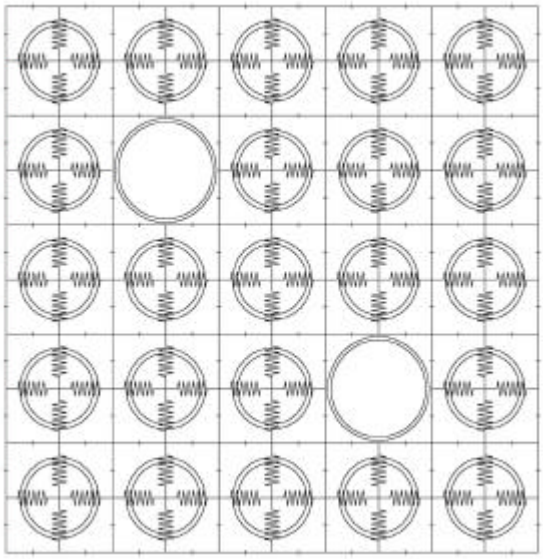


그림 11 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 단면 형상

안내관이 두 개인 경우 구조적으로 실제 핵연료집합체의 안내관 대 연료봉의 비율에 가장 유사할 뿐 아니라 열,수력적인 면에서 유리하기 때문에 앞 선 두가지의 경우와 달리 조금 더 자세한 해석을 수행하였다. 해석으로 얻어진 고유진동수를 188차까지 정리하면 다음의 표 4와 같다. 안내관이 하나인 경우에 비하여 집합체의 고유진동수가 약간 컸지만 큰 차이를 보이지는 않았으며, 단면 형상이 설정된 축에 대칭이 아니기 때문에 부분 집합체의 진동모드가 쌍으로 나타나지는 않았다. 안내관이 존재하는 대각선을 따른 축을 기준으로 90도 방향으로 일차 모드가 나타났으며, 2차 모드는 다시 90도 돌아간 방향, 즉 안내관을 잇는 대각선 방향으로 변위가 나타났다. 이러한 두 개의 모드는 집합체의 길이 방향으로 반파가 나타나는 전형적인 보의 일차 모드이며, 3차 및 4차 모드는 1차 및 2차와 동일한 방향으로 교대로 나타나지만 집합체의 길이 방향에서 보면 완파가 나타나는 보의 2차 모드이었다. 집합체의 5차 및 6차 모드의 경우도 단면에서 발생하는 모드의 방향은 앞선 모드와 동일하였으나 길이방향에서 보면 하나의 완파와 반파가 나타나는 전형적인 보의 3차 굽힘 모드이었다. 그림 12에 안내관이 두 개인 부분 핵연료집합체의 1차 진동모드를, 그림 13에 3차 진동모드를, 그리고 그림 14에 5차 진동모드형상을 도시하였다. 7차 진동 모드 이후 12차 모드까지는 부분 집합체의 진동모드와 단일 연료봉의 1차 진동모드가 연성되어 나타나는 모드이며, 13차 모드부터 50차 모드는 완전한 연료봉의 1차 진동모드로 판단되었다. 이러한 진동모드 중 50차 모드를 그림 15에 나타내었다. 그림 15는 변위가 발생하지않는 두개의 안내관과 일차모드를 나타내는 연료봉, 그리고 진동변위를 나타내지않는 연료봉을 각 하나씩 도시한 것이다. 이 때의 고유진동수는 26.63 ~26.64 Hz로 앞선 두 경우와 그리고 단일 연료봉의 해석 결과와 일치하는 결과이었다. 51차 및 52차 모드는 완전한 부분집합체의 고차 진동 모드이며, 53차 모드부터 57차 모드까지는 집합체와 연료봉의 2차 진동모드가 연성되어 나타나는 모드로 판단되었다. 그림 16에 부분 핵연료집합체의 51차 진동모드의 정면도를, 그림 17에 60차 진동모드 형상 중 안내관과 연료봉 하나만을 나타낸 사면도를 도시하였다. 부분 집합체의 58차 모드로부터 96차 모드까지는 연료봉의 2차 진동모드로

판단되었다.

표4 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 고유진동수

Mode No.	고유 진동수(Hz)	Mode No.	고유 진동수(Hz)
1	2.3351	2	3.6409
3	8.0284	4	9.2641
5	17.179	6	17.914
7	26.387	8	26.495
9	26.604	10	26.604
11	26.608	12	26.614
13	26.631	14	26.632
15 ~ 18	26.634	19 ~ 20	26.634
21	26.636	22 ~ 24	26.637
25 ~ 26	26.638	27 ~ 29	26.639
30 ~ 34	26.640	35 ~ 37	26.641
38 ~ 40	26.642	41 ~ 42	26.643
43 ~ 50	26.644	51	28.972
52	29.576	53	33.237
54	33.930	55	34.621
56	34.623	57	34.638
58 ~96	34.67 ~ 34.84	97	41.989
98	44.080	99	44.722
100	45.571	101	46.260
102	46.267	103	46.309
104	46.421	105 ~ 142	46.72 ~ 46.93
143	56.546	144	59.857
145	61.510	146	63.618
147	63.637	148	63.722
149	63.928	150 ~ 188	64.48 ~ 64.88

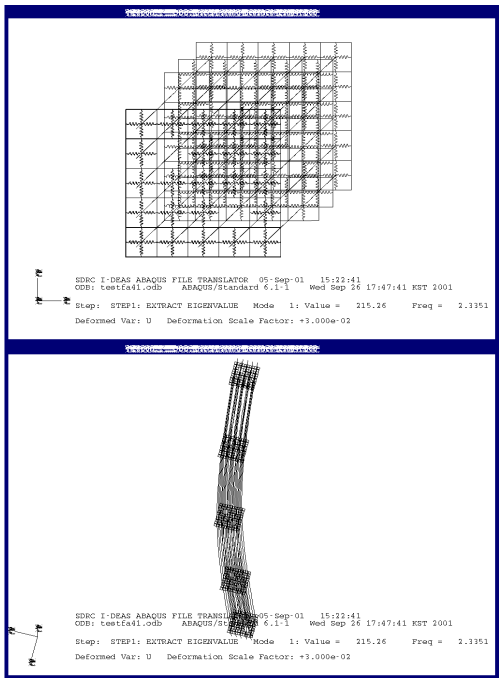


그림 12 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 1차 모드

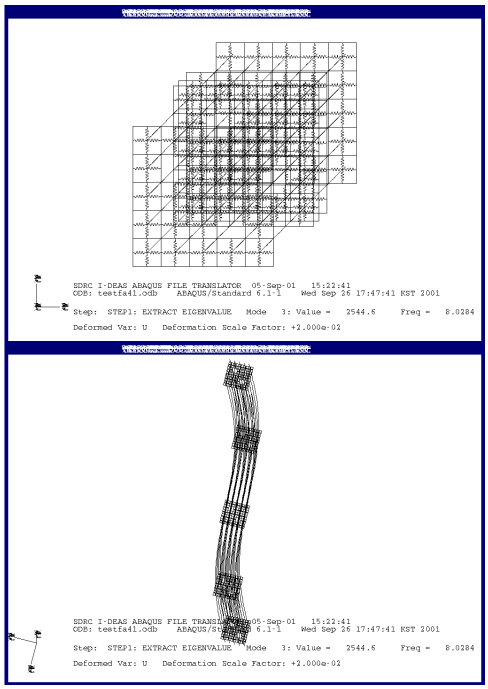


그림 13 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 3차 모드

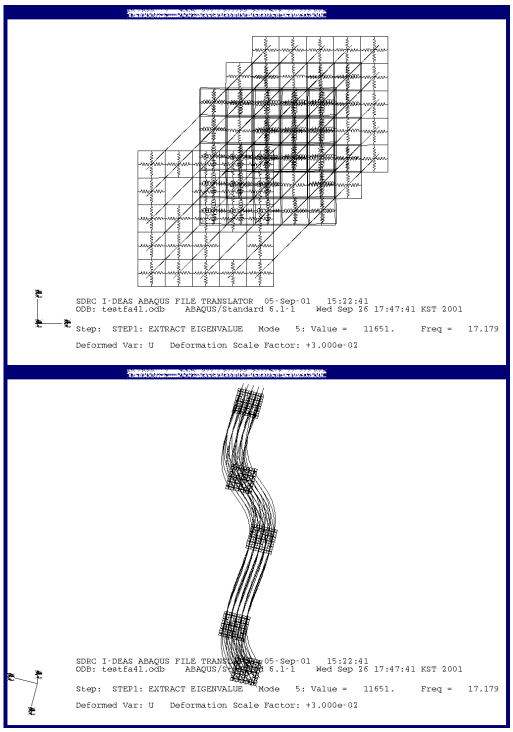


그림 14 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 5차 모드

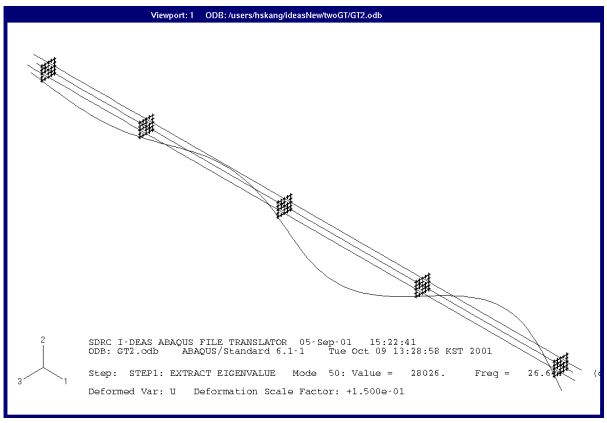


그림 15 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 50차 모드에서 안내관과 연료봉의 진동변위

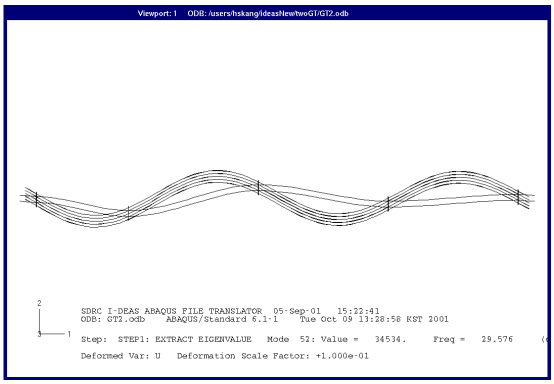


그림 16 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 51차 모드

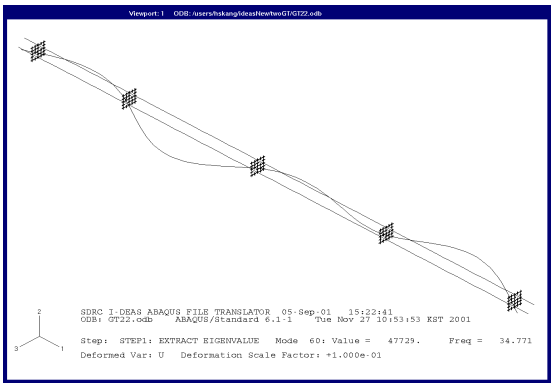


그림 17 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료집합체의 60차 모드

97차 모드 이후부터 104차 모드까지는 부분집합체의 고차 진동모드와 연료봉의 3차 진동모드가 연성되어 나타나는 구간이었다. 이러한 모드 중 100차 모드의 정면도를 도시하면 다음의 그림 18과 같다. 105차 진동모드부터 142차 진동모드까지는 완전한 연료봉의 3차 진동모드가 나타나는 구간으로 이 때 고유진동수는 46.7 Hz에서 46.9 Hz 범위로 계산되었다. 142차 모드에서 두개의 안내관과 3차 모드를 나타내는 연료봉 하나를 도시하여 그림 19에 나타내었다.

143차 모드에서 149차 모드까지는 부분 핵연료집합체의 고차 진동모드가 다시 나타나는 구간으로 이 때의 고유진동수는 56.55 Hz에서 63.93 Hz의 주파수 범위를 나타내었다. 그림 20에 145차 진동모드를 도시하였다.

150차 모드에서 188차 모드까지는 연료봉의 4차 진동모드가 나타났으며 이 때의

고유진동수는 64.5 Hz에서 64.9 Hz의 주파수 범위를 갖는 것으로 계산되었다.

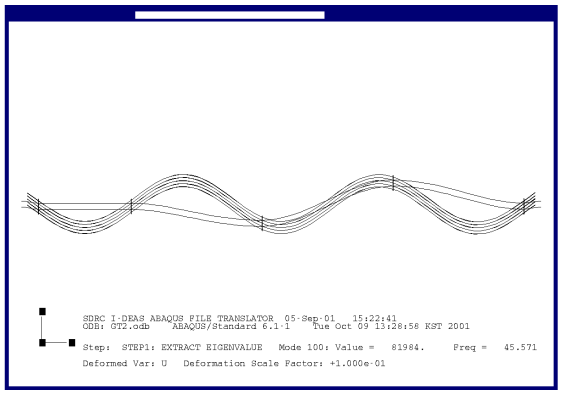


그림 18 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 100차 모드

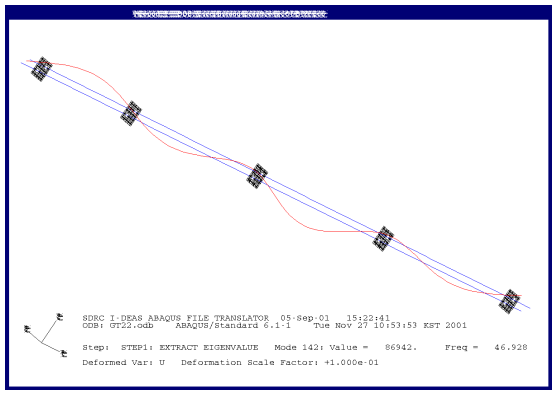


그림 19 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 142차 모드에서 안내관과 연료봉의 진동 형상

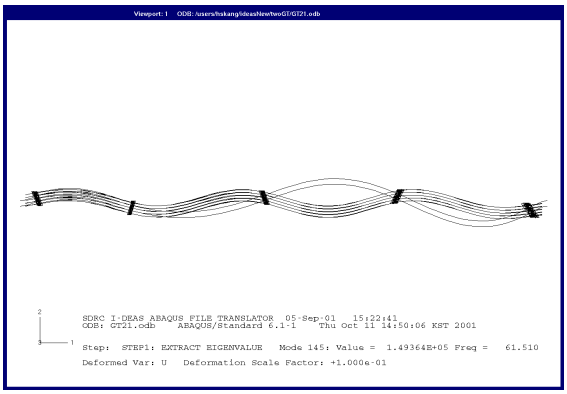


그림 20 안내관이 두 개인 5´5 부분 핵연료 집합체의 145차 모드형상

4. 결론

5개의 지지격자로 지지된 5×5 부분 핵연료집합체에 대한 유한요소 진동해석을 수행하였다. 모의 연료봉은 약 2.2 m 크기로 납으로 만든 모의 소결체가 채워져 있다고 가정하였으며 부분 집합체에는 이러한 연료봉이 21개(안내관이 4개), 23개(안내관이 2개), 24개(안내관이 1개) 가 존재한다고 가정하였다.

기존의 연구와 동일하게 5개의 지지격자 스프링으로 지지된 단일 연료봉에 대한 진동해석을 수행하고 부분 핵연료집합체의 진동해석으로부터 추출된 단일 연료봉의 결과와 비교하였다. 부분 핵연료집합체로부터 추출된 핵연료봉의 1차 고유진동수는 26.63~26.64 Hz 범위로 계산되어 단일 연료봉 해석으로 얻은 26.639 Hz와 거의 동일한 것으로 나타났으며, 모드형상의 경우도 차이가 없었다. 안내관이 2개 존재하는 경우로부터 얻은 연료봉의 2차 고유진동수는 34.67 ~ 34.84 Hz로서 단일 연료봉의 해석으로 얻은 34.756 Hz 보다 다소 크거나 작은 ± 0.1 Hz의 주파수 범위내에 존재하는 것으로 나타났다. 또한 3차 고유진동수의 경우 46.72~46.93 Hz 범위로서 단일 연료봉으로 얻은 46.695 Hz보다 최대 0.2 Hz정도 크게 계산되었으며 4차 고유진동수의 경우 64.48~64.88 Hz 범위로서

단일 연료봉의 해석으로 얻은 64.226 Hz보다 +0.2 Hz ~ + 0.6 Hz 범위의 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 미소한 차이가 발생하는 것은 단일 연료봉의 진동특성에 핵연료집합체가 어느 정도 영향을 미친다는 것을 의미하지만 계산으로 얻은 이 정도의 차이는 무시할 만 하기 때문에 부분 핵연료집합체의 해석으로부터 분리된 단일 연료봉의 진동해석결과는 단일 연료봉의 해석으로 얻은 결과와 동일한 것으로 간주하여도 문제가 없을 것으로 판단되었다.

안내관이 1개 혹은 4개 존재하는 경우, 부분 집합체의 단면이 면 방향으로 설정된 축에 대칭이기 때문에 진동하는 축 방향만을 달리하여 동일한 보의 굽힘진동모드가 2개 씩 쌍으로 나타남을 확인하였다. 3차원 해석을 수행한 결과 집합체의 보 진동 모드가 두면의 대각선 방향으로도 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 모든 경우에서 보의 3차 진동모드가 부분 집합체의 6차 모드에 걸쳐서 나타났으며, 최 저차 고유진동수의 경우 안내관이 하나인 경우 2.0754 Hz 이었고, 안내관이 두개인 경우 2.335 Hz 이었으며, 안내관이 네개인 경우 4.922 Hz 이었다.

안내관의 개수에 관계없이 저차 6개 모드에서 부분집합체의 3차 보 진동모드가 나타나고 그 후 부분 집합체와 연료봉이 연성되는 모드가 나타났으며, 점차 연성이 약해지다가 결국 봉의 1차 고유진동모드가 나타났다. 연료봉이 집단으로 흔들리는 모드를 부분 집합체의 평면에서 보면 변화무쌍한 대칭성이 계속하여 나타남을 확인 할 수 있었다. 봉의 1차 모드가 삼십 여 개 나타나고 나면 다시 부분 집합체의 진동모드 그리고 집합체와 연료봉의 진동모드가 연성되어 나타난 후 연료봉의 2차 진동모드가 삼십 여 개 나타나고, 다시 집합체의 진동모드가 나타났다가 연료봉의 3차 진동모드가 나타나는 형태가 고 주파수로 가면서 계속 반복되었다.

본 연구를 통하여 개발된 부분 핵연료집합체의 유한요소모델은 실제 부분 핵연료집합체를 제작한 후 검증시험을 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음

참고 문헌

[1] User's Manual, MTS System Corporation, IDEAS Master Series 7.0., 2000

[2] HKS, "ABAQUS Ver.5.8 User's Manual", 1999

[3] H.S. Kang, et. al., "Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure", J. of the Korea Nuclear Society, Vol. 33, pp. 73~82, 2001.

[4] H.S.Kang, et. al., "A Study on the Vibrational Behavior of the Fuel Rods Continuously Supported by a Rotary and Bent Spring System, "Korea Sound and Vibration Society, pp. 454~460, May 1998.