2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

최적화 H형 지지격자체(5×5)의 자유진동특성

Free Vibration Characteristics of Optimized H Type Spacer Grids (5×5)

최명환, 강흥석, 윤경호, 김형규, 송기남
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 최적화 H형 지지격자체에 대한 자유진동특성에 대하여 언급하였다. 지지격자에 의해 연속 지지된 연료봉의 진동시험에 사용된 경계조건과 동일한 하단부 2점(혹은 3점)이 고정된 조건과 자유조건에서의 진동특성을 얻기 위한 시험 및 해석이 수행되었다. 진동시험은 충격해머와 가속도계를 이용한 충격가진법으로 수행하였고, 센서로부터의 신호를 획득하고 분석하기 위하여 I-DEAS의 TDAS 프로그램을 이용하였다. 유한요소해석에 관련한 프로그램은 기하학적 형상 모델 및 요소망 생성을 위해 I-DEAS, 모달해석을 위해 ABAQUS 프로그램을 이용하였다. 시험에 의해 측정된 최적화 H형 지지격자체의 기본진동수는 2점 고정된 경우 175.18 Hz로 굽힘모드를 보였으며, 이 값은 30~120 Hz 영역에 존재하는 연료봉의 고유진동수 보다 높은 값이기 때문에, 연료봉과 지지격자체 사이의 공진은 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 자유 경계조건에서 기본진동수는 349.2 Hz로 비틀림 모드를 보였고, 유한요소해석 결과와 최대 7%이내에서 서로 잘 일치하였다. 또한 고유진동수와 모드형상 결과들로부터 충격, 좌굴, 진동해석을 위한 최적화 H형 지지격자체의 유한요소 해석모델이 신뢰성 있게 생성되었음을 확인하였다.

Abstract

This paper is described the free vibration characteristics of Optimized H Type (OHT) spacer grids (SG). The vibration test and the finite element (FE) analysis under the free boundary condition and the clamped at two points (or three points) in the bottom which is the same one as the experimental condition for the dummy rod continuously supported by spacer grids are performed. A modal test is performed by the impulse excitation method using an impulse hammer and an accelerometer, and the TDAS module of the I-DEAS software is used to acquire and analyze the sensor's signals. The software related to the FE analysis is the I-DEAS for the

geometrical shape modeling and meshing and an ABAQUS for solving. The fundamental frequency of the OHT SG under a clamped condition at two points is 175.18 Hz, and shows a bending mode. We think there is no resonance between the fuel rod and the SG because the SG's frequency is higher than that of the fuel rod existing in the range from 30 to 120 Hz. The fundamental frequency of the SG under the free boundary condition is 349.2 Hz showing a twisting mode, and the results by two methods have a good agreement with maximum 7 % in error. It is also found that the FE analysis model of the OHT SGs to analyze an impact, a buckling and a vibration et al. has been generated with reliability.

1. 서 론

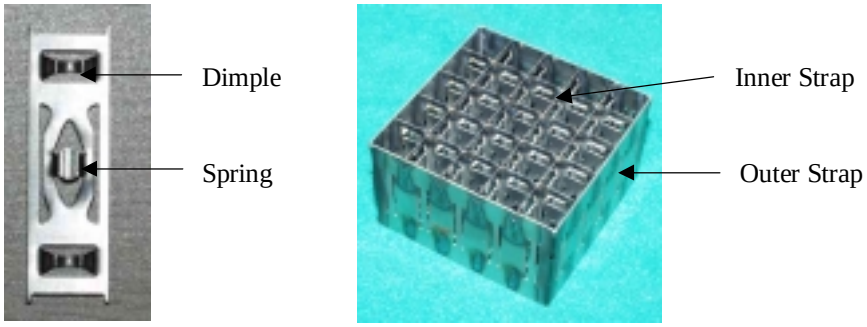
가압경수로용(pressurized water reactor; PWR) 핵연료집합체(fuel assembly)의 지지격자체 (spacer grid; SG)는 원자로 내에서 핵연료 봉을 지지하고, 지진과 같은 외부 하중으로부터 핵연료 봉을 보호하며 원자로 긴급냉각이 가능하도록 충분한 구조강도를 갖추어야 하는 중요한 구조물이다. 한국원자력연구소의 고성능지지격자구조기술개발 과제에서는 그 동안 몇 가지 새로운 형태의 지지격자를 고안하고, 특허를 출원하는 한편, 새로운 지지격자의 성능을 검증하고자 이와 관련된 기계/구조적 기반기술연구 및 시험을 수행하였다.[1] 이러한 지지격자의 기계/구조적 성능을 검증하는 기본 시험으로는 지지격자 스프링 특성시험, 지지격자체에 대한 충격 및 좌굴시험, 연료봉 지지부위에 대한 프레팅 마멸시험 그리고 연료봉 지지성능시험 등이 있다.[2~4] 특히 연료봉의 진동과 관련하여 원자로 내에서 0~50Hz 사이의 광대역 진동원이 존재하는 것으로 알려져 있으며,[5] 이러한 진동원과 연료봉 사이의 공진이 발생하면 연료봉의 진동 진폭이 커지기 때문에 파손의 우려가 있어 이를 피하기 위한 설계가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 실제 노내에서의 운전중 측정이 가장 바람직하나, 현실적으로 어려움이 많기 때문에 한국원자력연구소에서는 몇몇 개발된 5×5 부분 지지격자체로 지지된 모의 연료봉에 대한 진동시험 및 해석을 수행해 왔으며,[6,7] 최근에 주후보로 선정된 최적화 H형(Optimized H type; OHT) 지지격자와 새이중판(New Doublet; ND) 지지격자로 지지된 연료봉에 대한 진동시험 및 시험기술 개발, 해석모델의 개발 등에 대한 연구가 집중적으로 수행되었다.[8~11]

본 논문에서는 두 주후보 지지격자체 중에서 최적화 H형 지지격자체의 자유진동 특성에 대하여 기술하였다. 본 연구의 목적은 크게 세 가지로 요약할 수 있는데, 첫째는 지지격자체에 의해서 지지된 연료봉의 고유진동 특성을 파악하는데 있어서, 연료봉이 삽입되기 이전 지지격자체의 진동거동을 파악함으로써 지지격자체와 연료봉 사이의 공진 가능성을 평가하는 것이다. 둘째는 현재 계획되고 있는 2,189 mm의 5×5형 핵연료봉 집합체의 진동시험시, 5개의 지지격자체는 2개의 제어봉과 23개의 모의 연료봉이 장착된 상태에서 아무런 구속이 없는 자유상태에 놓이게 된다. 따라서 연료봉이 지지격자체에 삽입되어 집합체를 이루었을 때의 거동을 예측하고, 평가하는데 필요한 자유상태에서의 지지격자체의 진동특성을 얻는데 있다. 마지막으로 지지격자체의 충격, 좌

굴, 진동해석 등을 수행하기 위한 유한요소 전모델(full model)의 평가에 있어서, 자유 경계조건에서의 고유진동수와 모드형상 등의 결과 비교는 해석모델이 신뢰성 있게 생성되었고, 만족할 만한 결과를 보이는 가를 평가하는 기준이 될 수 있을 것이다. 이상의 목적을 이루기 위하여 본 연구에서는 충격해머와 가속도계를 이용한 모달시험(modal testing)을 수행하였고, 진동시험 결과의 분석은 I-DEAS[12]의 시험 모듈인 TDAS를 이용하였으며, 수치적 방법에 의한 진동해석은 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS[13]로 수행하였다.

2. 해석모델

Fig. 1는 최적화 H형 5×5 부분 지지격자체의 형상을 나타낸 것으로, 단위 셀(cell)에는 하나의 스프링(spring)과 그 반대쪽에 있는 두 개의 딤플(dimple)이라고 부르는 구조로 되어 있다. 이러한 스프링과 딤플의 지지구조는 다시 90° 돌아간 평면상에 한 세트(set)가 더 존재하기 때문에, 지지격자는 단일셀 당 2개의 스프링과 4개의 딤플로 연료봉을 지지하게 된다. 지지격자체의 외형적인 치수는 폭×높이×길이가 65×65×40 mm이고, 내부 격자판(inner strap)은 0.457 mm 두께, 외부 격자판(outer strap)은 내부 판보다 두꺼운 0.664 mm 두께의 판으로서 모두 Zircaloy-4 재질로 이루어져 있다. 또한 지지격자체의 내부 격자판은 Fig. 1(a)의 단위 셀이 길이방향 1/2은 연결되고, 1/2은 홈을 가지고 있는 형상이 연속적해서 횡방향으로 배열된 형상을 갖으며, 내부 격자판들을 가로, 세로로 엇갈리게 조립하고, 엇갈린 격자판의 교차점을 레이저 용접함으로 제조되었다.



(a) Unit cell (b) Optimized H type spacer grid

Fig. 1 Shape of the Optimized H type spacer grid

3. 진동시험

본 연구에서 진동시험은 크게 세 경우의 경계조건에 대하여 수행하였는데, Fig. 2는 이들 경계조건에 대한 개념도를 나타내었다. 첫째, (a) 2-Fix는 그 동안 연료봉의 진동시험에 사용되어온 지지격자체 하단부의 양 측면을 길이방향으로 변위와 회전을 고정하는 경우이고, 둘째, (b) 3-Fix는

하단부의 세 셀에서 고정하는 경우로서 지지조건의 영향을 평가하기 위함이다. 마지막으로 (c) Free는 아무 구속조건도 없는 자유 경계조건에 대한 개념이다. 또한 Fig. 3은 하단부 2점을 고정한 상태에서 지지격자체의 중앙에 연료봉이 삽입되어 있는 형상을 나타내었다.

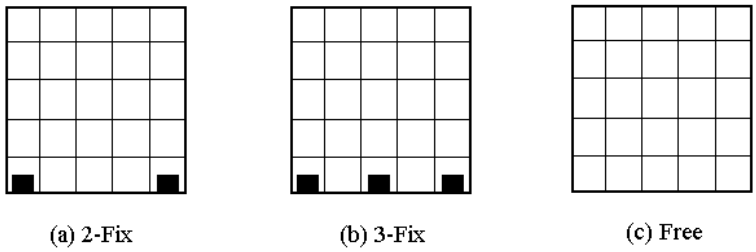


Fig. 2 Schematic view of the boundary condition

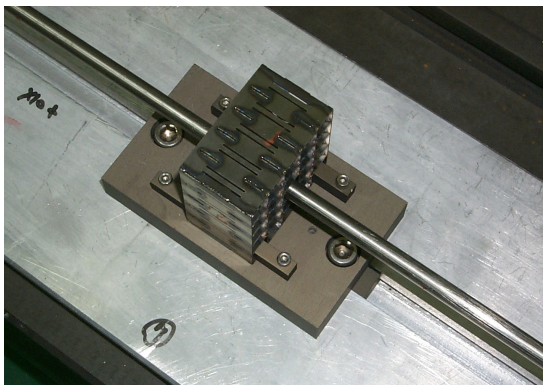
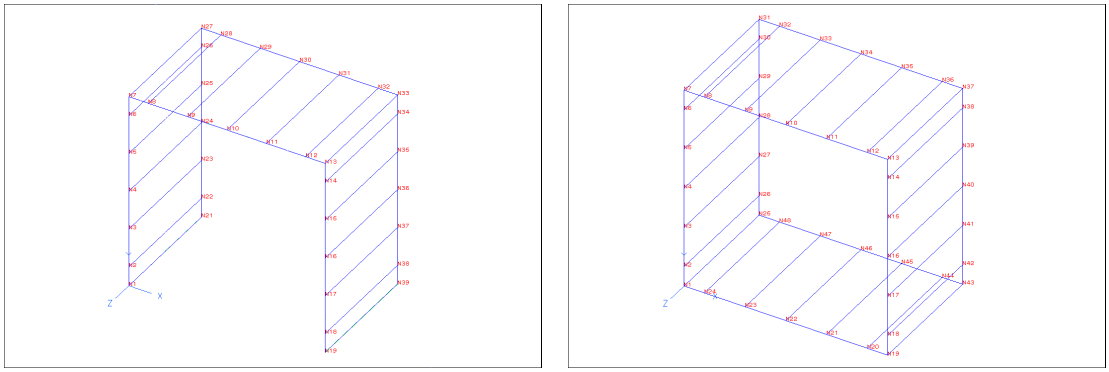


Fig. 3 Shape of the fuel rod inserted in the spacer grid

시험을 위한 TDAS에서의 기하학적 형상모델을 Fig. 4에 나타내었는데, (a)는 하단부 2점 혹은 3점을 고정하는 경우의 데이터 획득을 위한 모델로 38 절점으로 구성하였고, 이때 하부 바닥면은 베드에 접해 있기 때문에 측정하지 못했다. (b)는 자유 조건에서의 시험을 위한 모델로서 총 48 절점으로 구성하였다. 시험모델에서 절점들은 모드형상을 얻기 위한 가진점에 해당하며, 가진점은 내부판과 외부판이 용접된 점들 사이와 외부 격자판의 양쪽 자유단의 가장자리를 가진하였다.

모달시험은 비교적 간단하면서도 정확한 결과를 얻을 수 있는 충격해머(impulse hammer)와 가속도계(accelerometer)를 이용한 충격가진법을 이용하였다. 이때 사용한 충격해머는 플라스틱 팁을 갖는 B&K Type 8202, 가속도계는 질량의 영향을 최소화하기 위하여 0.65g의 중량을 갖는 B&K Type 4374를 사용하였다. 그 외에 B&K NEXUS 앰프, HP Agilent VXI Front End system, HP x2000 W/S 등의 hardware가 사용되었고, 데이터 획득 및 처리를 위하여 I-DEAS 모듈의 TDAS software가 사용되었다.



(a) 2-Fix or 3-Fix (b) Free

Fig. 4 Test model of the spacer grid with the boundary condition

시험에서 가속도계의 부착 위치는 유한요소해석을 통한 결과를 참고하여 노달라인(nodal line)이 발생하지 않는 점을 선택하였다. 해석결과 지지격자체의 저차에서의 진동모드는 하단부 고정시 횡방향 굽힘모드가 지배적이며, 비틀림 모드도 고차에서 발생하였다. 따라서 이들을 참고하여 횡방향의 굽힘과 비틀림 모드를 측정할 수 있는 상단부 모서리 절점에 가속도계를 부착하였다. 이 점은 시험모델(Fig. 4)에서 절점 7X+(앞면 좌측 상단모서리)에 해당하며, 자유상태의 시험에서도 모서리 부분에 가속도계를 부착하였다. 또한 자유조건에서의 시험은 고무줄을 이용하여 지지격자체를 매달고 시험을 수행하였다.

4. 유한요소해석

시험결과의 비교/검증 및 해석모델의 평가를 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용한 진동해석을 수행하였다. 지지격자체의 형상 모델링은 I-DEAS를 이용하였고, 해석에 사용한 요소는 4절점 탄소성 쉘요소(S4R)이다. 유한요소 해석모델에서 지지격자체 모델의 용접부위에 대한 표시를 Fig. 5에 나타내었다. 모델에서 수직, 수평 내부 격자판들이 교차하는 부분의 용접부위는 ABAQUS에서 *MPC(Multi Point Constraints) 기능을 이용하여 구속하였으며, 외부 격자판의 상하 좌우면과 모서리 부분의 용접부는 절점들이 서로 공유되도록 처리하였다. 해석을 위해 생성한 지지격자체의 유한요소 해석모델을 Fig. 6에 나타내었는데, X 좌표는 폭, Y는 높이, Z는 길이방향의 좌표를 나타낸다. 생성된 모델의 절점과 요소의 수는 각각 47,952개와 40,320개이고, 모달해석은 Lanczos 방법을 이용하였다. 고려된 경계조건으로서 하단 고정부는 변위와 회전을 모두 구속하였다. 또한 시험에서 지지격자체는 하단부 바닥면은 베드에 접해 있어 –Y 방향의 변위는 구속되나 +Y 방향의 변위는 구속되지 않는다. 그러나 해석에서는 바닥면을 높이 방향(Y) 변위를 구속하였기 때문에 실제 조건과 약간 다를 수가 있다. 진동해석에 사용한 기본적인 물성으로는 Zircaloy-4 재질의 탄성계수 108.3 GPa, 밀도 6,600 kg/m^3, 프와송비 0.294를 사용하였다.

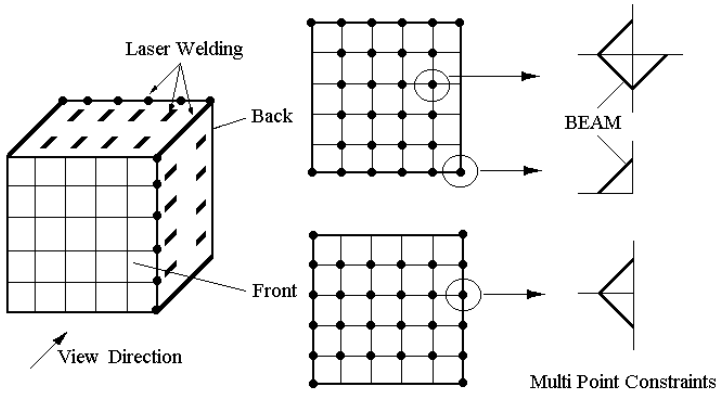


Fig. 5 Schematic view of welding points of the OHT spacer grid

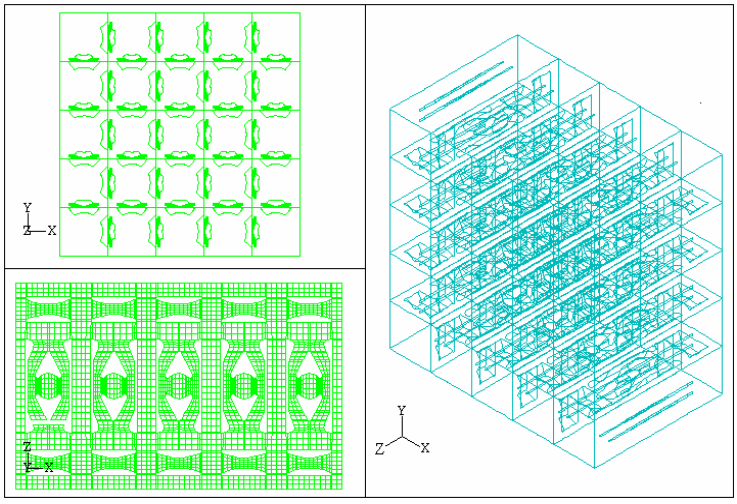


Fig. 6 Finite element model of the OHT spacer grid

5. 결과 및 고찰

Table 1은 유한요소해석을 통하여 얻은 최적화 H형 지지격자체에 대한 경계조건에 따른 고유진동수를 나타내었고, Fig. 7은 하단부 2점이 고정된 경우의 유한요소 모드형상을 나타내었다. 하단부 2점이 고정된 경우에 기본진동수는 153.71 Hz이고, 처음 1, 2, 3차 모드에서는 내부, 외부 격자판의 X방향 굽힘모드가 발생하였다. 또한 4~10 번째 모드들은 내부 격자판 만의 굽힘모드를 보였는데, 이렇게 7개의 모드가 1142~1156 Hz 범위에서 나타나는 것은 수직, 수평방향 내부 격자판의 형상이 동일하기 때문이고, 약간씩 진동수에 차이가 있는 것은 경계조건의 영향으로 판단된다. 또한 외부 격자판과 내부 격자판의 두께 차이로 인한 격자체의 강성 차이 때문에 외부 격자판은 움직이지 않고 주로 내부 격자판 만의 변위가 발생하는 국부적인 거동이 나타나는 것으로 보인다.

하단부 3점을 고정한 경우, 해석에서의 고유진동수는 2점을 고정하는 경우와 동일한 결과를 보였으며, 모드형상도 동일하였기 때문에 여기서는 나타내지 않았다. 해석에서 하단부를 2점 고정하는 경우와 3점을 고정하는 경우에 큰 차이가 없는 것은 경계조건을 적용할 때 하단부의 높이방향(Y) 변위를 구속하였기 때문이다.

하단부를 고정한 외팔형태의 경계조건과는 달리 자유상태에서의 지지격자체의 진동수에는 많은 차이가 있음을 Table 1로부터 확인할 수 있다. 자유 조건에서 기본진동수는 325.16 Hz로 2점 고정한 외팔형의 조건에 비해 약 2배 증가함을 보였다. 기본진동수에서는 X, Y방향의 1차 비틀림 모드가 나타났으며, 2차 모드에서 X, Y, Z방향의 비틀림 모드를 보이고, 3차와 4차인 약 656 Hz에서 첫번째 굽힘모드가 나타났다. 다음 1063.8 Hz에서 XY방향의 2차 굽힘모드가 나타난 후, 1151~1153 Hz 범위에서 내부 격자판 만의 거동을 보였다. 이들 모드는 하단부를 고정하는 경우와 거의 동일한 대역에서 거동하였고, 지지격자체가 대칭형상을 갖기 때문에 하단부 고정에 비해 주파수 변화폭이 작음을 알 수 있다.

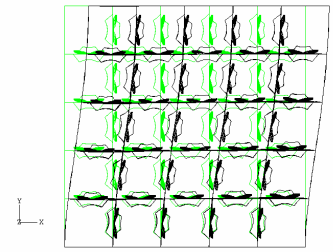
Table 1 Natural frequencies of the OHT spacer grid by FE analysis

B.C. / Mode	Natural Frequencies (Hz)				
	2-Fix	3-Fix	Mode	Free	Mode
1	153.71	153.71	X-dir. 1st B*	325.16	XY-dir. 1st T**
2	557.14	557.15	X-dir. 2nd B	437.47	XYZ-dir. 1st T
3	1120.4	1120.4	X-dir. 3rd B	655.84	XY-dir. 1st B
4	1142.6	1142.6	Inner Strap Ver. B	656.11	XY-dir. 1st B
5	1152.2	1152.2	"	1063.8	XY-dir. 2nd B
6	1152.8	1152.8	"	1151.0	Inner Strap B
7	1153.2	1153.2	"	1151.9	"
8	1154.9	1154.9	Inner Strap Hor. B	1152.3	"
9	1156.1	1156.1	"	1152.5	"
10	1156.4	1156.5	"	1152.7	"
11	1321.3	1321.4	"	1153.2	"
12	1471.6	1471.6	Inner Strap 2nd B	1294.7	XY-dir. 2nd B

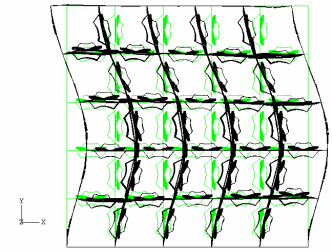
------ : This mode is the same one as the experimental result

B* : Bending mode

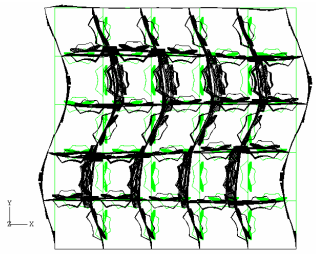
T** : Twisting mode



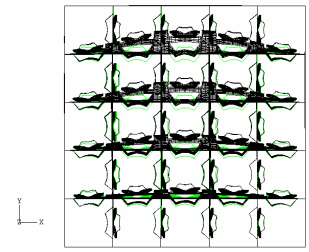
1st mode (153.71 Hz)



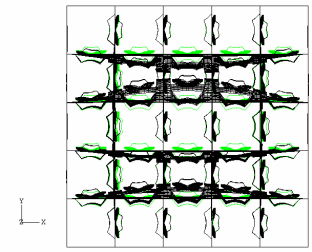
2nd mode (557.14 Hz)



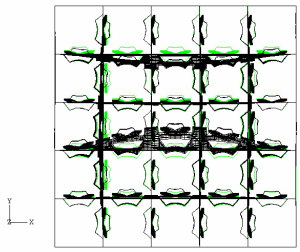
3rd mode (1120.4 Hz)



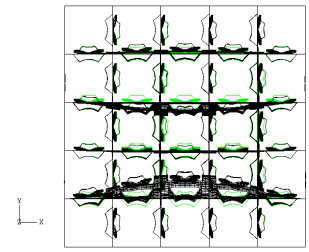
4th mode (1142.6 Hz)



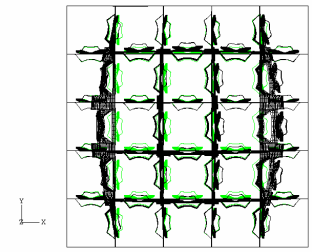
5th mode (1152.2 Hz)



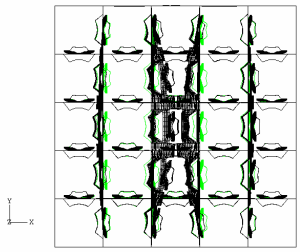
6th mode (1152.8 Hz)



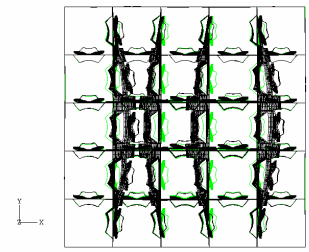
7th mode (1153.2 Hz)



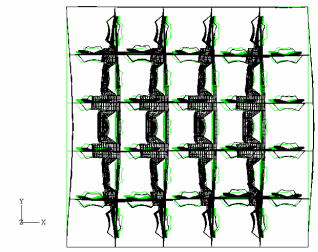
8th mode (1154.9 Hz)



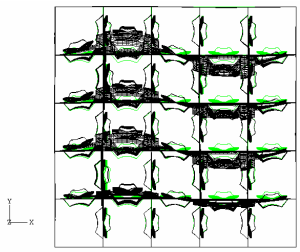
9th mode (1156.1 Hz)



10th mode (1156.4 Hz)



11th mode (1321.3 Hz)



12th mode (1471.6 Hz)

Fig. 7 FEA mode shapes of the OHT spacer grid for the 2-Fix boundary condition

Table 2는 최적화 H형 지지격자체의 경계조건에 따른 처음 5개의 중요 모드에 대한 고유진동수 비교를 나타내었는데, 시험에서의 설정 주파수 범위인 1,280 Hz의 범위 내에 5개의 고유진동수가 존재하였다. 연료봉의 진동시험과 동일한 조건인 2점을 고정하는 경우, 시험을 통한 기본진동수는 175.18 Hz를 보였고, 시험과 해석 결과의 차이는 21.5 Hz로 약 12.3%의 차이를 보였다. 또한 2차, 3차 굽힘모드에서도 각각 13.0%와 10.2%의 차이를 보였다. 하단부 2점 고정한 경우의 시험 모드형상을 Fig. 8에 나타내었는데, 3, 4번째 비틀림 모드가 해석에서는 나타나지 않았다. 반대로 해석에서 보였던 내부 격자판 만의 굽힘모드는 시험에서 측정 주파수 범위 내에 존재하지 않았다.

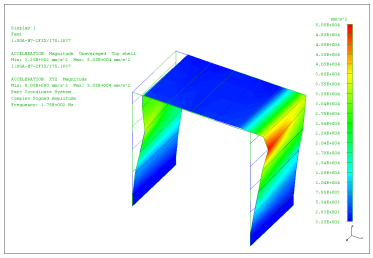
이전의 연구결과에 의하면 지지격자로 연속 지지된 연료봉의 처음 5차 까지의 고유진동수는 약 30~120 Hz 범위에 존재하였으며,[7,10] 8개의 최적화 H형 지지격자로 지지된 3,847 mm 연료봉의 경우 120 Hz 범위 이내에 8개의 모드가 존재하였다.[9] 따라서 시험조건과 동일한 하단부 2점 지지 상태에서 지지격자체의 기본진동수가 175 Hz 이상이라는 것을 고려한다며, 연료봉의 진동시험시 지지격자체와 연료봉 사이의 공진현상은 발생하지 않는 것으로 평가된다.

하단부 3점을 고정한 경우, 해석에서는 경계조건에 따른 변화가 없었다. 그러나 시험에서는 약간의 차이가 있었는데, Table 2의 2-Fix와 3-Fix의 시험결과를 비교해 보면, 굽힘모드를 보이는 진동수에서는 약 1~3 Hz 정도 증가된 값을 보였으나, 이것은 하단부 지지조건이 굽힘모드에는 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다. 즉, 2점 지지나 3점 지지가 굽힘모드의 측면에서는 동일한 지지조건으로 볼 수 있다. 그러나 비틀림 모드를 보이는 3번째와 4번째 모드의 고유진동수에서는 비교적 큰 차이가 있다. 3번째 모드는 약 81 Hz 증가로 8.6%, 4번째 모드는 71 Hz 증가로 6.7%의 고유진동수 증가를 보였다. 이러한 결과로부터 지지격자체의 하단부 중앙부를 추가로 고정하는 3점 고정은 굽힘모드와는 달리 비틀림 모드의 고유진동수에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

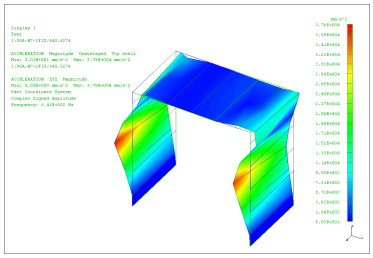
Table 2 Comparison of the natural frequencies of the OHT spacer grid with the boundary condition

B.C. / Mode	2-Fix			3-Fix			Free		
	Test	FEM	Diff.*	Test	FEM	Diff.	Test	FEM	Diff.
1	175.18	153.71	12.3	176.04	153.71	12.3	349.20	325.16	6.9
2	640.63	557.14	13.0	643.49	557.15	13.0	441.42	437.47	0.9
3	858.47	-	-	939.44	-	-	660.79	655.84	0.7
4	981.58	-	-	1052.8	-	-	679.21	656.11	3.4
5	1247.7	1120.4	10.2	1250.3	1120.4	10.2	1075.1	1063.8	1.1

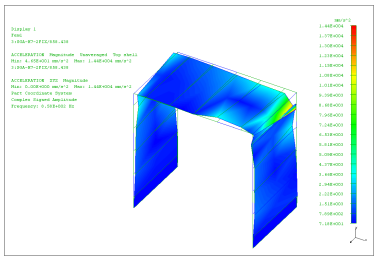
* Diff. = (Test-FEM)/Test × 100(%)



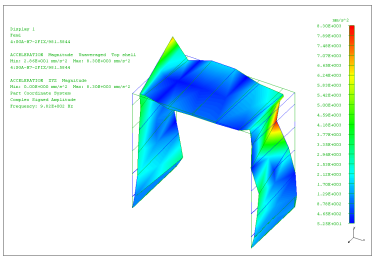
1st bending (175.18 Hz)



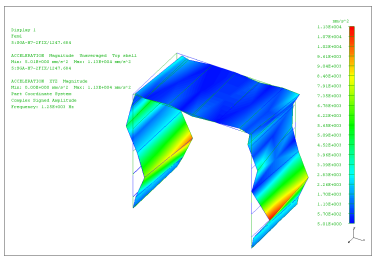
2nd bending (640.63 Hz)



Twisting (858.47 Hz)



Twisting (981.58 Hz)

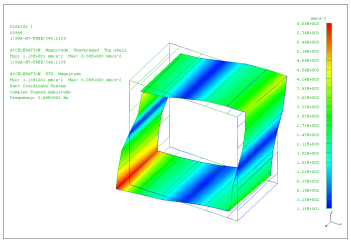


3rd bending (1247.7 Hz)

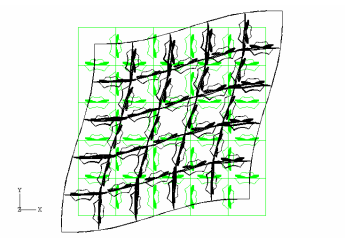
Fig. 8 Experimental mode shapes of the OHT spacer grid for the 2-Fix boundary condition

자유 조건에서의 해석과 시험을 통한 고유진동수와 모드형상의 비교를 각각 Table 2와 Fig. 9에 나타내었다. 자유조건에서도 측정 범위 내에서 5개의 고유진동수가 존재하였고, 기본진동수는 349.20 Hz로서 하단부를 고정하는 경계조건보다는 약 2배 정도 증가하였으나, 나머지 2~5차 모드의 진동수는 하단부 고정 조건보다는 낮은 진동수를 보였다. 자유상태에서의 모드는 저차인 첫번째와 두번째 모드에서 비틀림 모드가 나타나는데, 1차 모드는 X, Y 방향의 비틀림 변위를 보였으나, 2차 모드에서는 Z방향으로의 비틀림도 같이 발생하는 모드를 보였다. 나머지 세번째와 네번째 모드는 1차 굽힘, 다섯번째 모드는 2차 굽힘모드가 순차적으로 나타났다.

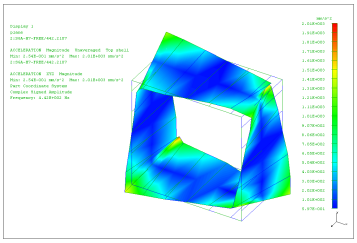
이상의 시험과 해석 결과들의 비교로부터, 시험결과는 해석에 비해 하단부 고정시 평균 12%, 자유 조건에서는 3% 정도의 오차를 갖고 높은 고유진동수를 보였으며, 두 방법에 의한 모드들은 서로 잘 일치하여 유한요소해석 모델이 신뢰성 있게 생성되었으며, 시험과 해석 결과는 신뢰할만한 것으로 평가되었다. 하단부 고정 경계조건에서 지지격자체는 자유조건에 비해서 비교적 큰 차이를 보였는데, 그 원인으로는 유한요소 모델의 문제라기 보다는 시험과 해석상에서 구현한 경계조건의 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 해석에서는 하단부 전면의 절점에 대하여 높이방향(±Y)의 변위를 구속하였으나, 시험 조건에서는 고정부를 제외한 다른 부분이 –Y방향 변위는 구속되나 +Y방향 변위는 자유롭기 때문이다. 또한 경계조건의 차이 뿐만 아니라 가진점을 정확히 가진하지 못한 경우의 불규칙한 신호, 데이터 처리하는 과정에서 발생하는 오차 등이 시험과 해석 결과의 차이를 유발하는 원인이 될 수 있을 것으로 생각된다.



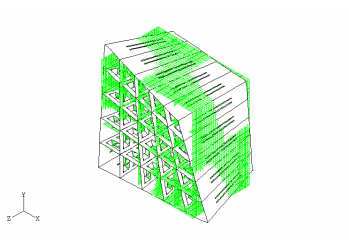
349.20 Hz



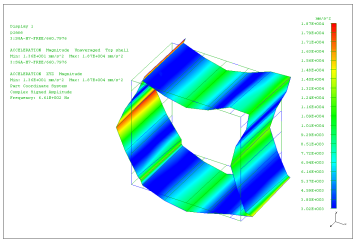
325.16 Hz



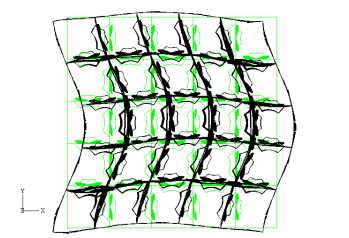
441.42 Hz



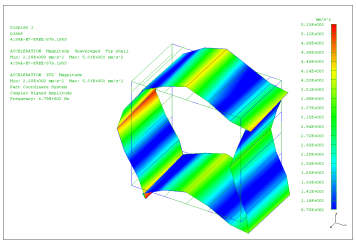
437.47 Hz



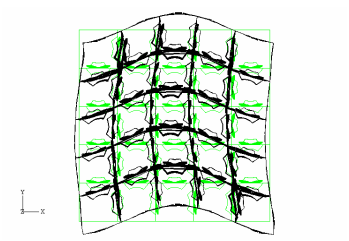
660.79 Hz



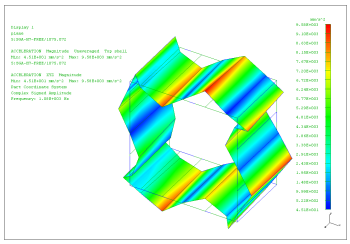
655.84 Hz



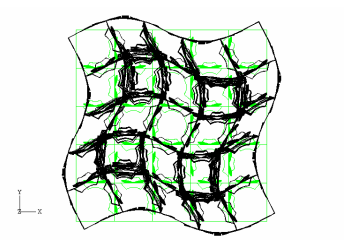
679.21 Hz



656.11 Hz



1075.1 Hz



1063.8 Hz

(a) Experiment

(b) FEA

Fig. 9 Comparison of mode shapes of the OHT spacer grid for the free boundary condition

6. 결 론

최적화 H형 지지격자체에 대한 자유진동특성을 얻기 위한 진동시험 및 유한요소해석을 수행하였으며, 경계조건에 따른 결과의 비교, 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지지격자체 하단부를 2점 고정하는 경우, 기본진동수는 175.18 Hz로 굽힘모드이고, 내부 격자판 모드의 진동수가 1142~1156 Hz 대역에 존재함을 고려한다면, 처음 5차 혹은 8차 까지의 고유진동수가 120 Hz 이내에서 거동하는 연료봉과는 공진이 발생하지 않을 것으로 판단된다.
(2) 하단부 3점 고정시, 2점 고정에 비하여 굽힘모드에서는 고유진동수가 약간 증가하였으나, 비틀림 모드에서는 비교적 크게 증가하여 하단부의 고정이 내부 격자판의 비틀림 모드에 영향을 줌을 확인하였다. 그러나 해석에서는 하단부 고정조건에 관계없이 같은 결과를 보였는데, 이는 격자체 바닥면의 ±Y방향 변위를 구속하였기 때문이다.
(3) 자유 경계조건에서 시험을 통한 최적화 H형 지지격자체의 기본진동수는 349.2 Hz로 X,Y 방향 비틀림 모드이고, 325.16 Hz를 보인 해석결과와 6.9%의 오차를 보였다. 2차 모드는 X, Y, Z 방향 비틀림 모드이고, 3, 4, 5차 모드는 굽힘모드를 보였으며, 해석결과 내부 격자판 만의 굽힘모드는 1151~1153 Hz 범위에 6개가 존재하였다.
(4) 시험을 통한 자유 경계조건에서의 고유진동수는 해석결과와 평균 3%이내에서 서로 잘 일치하였으며, 이들 결과를 통하여 충격, 좌굴, 진동해석을 위한 지지격자체의 유한요소 전모델이 신뢰성 있게 생성되었다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력개발사업인 고성능 지지격자 구조기술개발 과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 송기남 외 11인, 2003, "고성능 지지격자 구조기술 개발", KAERI/RR-2308/2002, 한국원자력연구소.
2. 윤경호 외 7인, 1998, "일체형 원자로용 지지격자 시편의 기계적 성능평가 시험", KAERI/TR-1147/98, 한국원자력연구소.
3. 윤경호, 송기남, 강흥석, 김형규, 2001, "지지격자 스프링/딤플의 기계적 특성시험 및 유한요소해석", KAERI/TR-1763/2001, 한국원자력연구소.
4. H.S. Kang, et al., 2001, "Evaluation of Spacer Grid Support Performance by Vibration Test", KAERI/TR-1738/2001, 한국원자력연구소.

5. Stoller Report, 1995, "A Study of Grid-to-Rod Fretting Wear in PWR Fuel Assemblies", SMSC, Vol. 1, April.
6. 이상설 외 7인, 2000, "연료봉 지지거동 및 진동해석 모델검증시험", KAERI/CM-328/99, 한국항공우주연구원.
7. H.S. Kang, K.N. Song, H.K. Kim, K.H. Yoon and Y.H. Jung, 2001, "Verification Test and Model Updating for a Nuclear Fuel Rod with Its Supporting Structure", Journal of Korean Nuclear Society, Vol.33, No.1, pp.73~82.
8. 최명환 외 4인, 2002, "최적화 H형 및 새 이중판 지지격자로 연속 지지된 모의 연료봉의 진동해석", KAERI/TR-2063/2002, 한국원자력연구소.
9. 최명환, 강흥석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2002, "최적화 H형 지지격자로 지지된 경수로용 모의 연료봉의 진동특성", 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집, Paper No. KNS-02F018.
10. 최명환, 강흥석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2003, "지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동특성", 대한기계학회논문집A, 제27권, 제3호, pp. 424~431.
11. 강흥석, 윤경호, 김형규, 송기남, 2002, "경수로용 부분 핵연료집합체(5×5)의 진동해석을 위한 유한요소모델 개발", KAERI/TR-2008/2002, 한국원자력연구소.
12. SDRC, 2002, "I-DEAS Master Series 9.0", Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
13. H.D. Hibbit, G.I. Karlsson and E.P. Sorensen, 2001, "ABAQUS/Standard User's Manual", Ver. 6.3, HKS Inc., RI, USA.
14. D.J. Ewins, 1984, "Modal Testing: Theory and Practice", John Wiley & Sons Inc.., New York.