2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

측면 절개형 이중판 지지격자체(5×5)의 자유진동 특성

Free Vibration Characteristics of Side-slotted Doublet Spacer Grids (5×5)

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

요 약

원자력연구소의 고성능지지격자개발과제는 개발과정에 있는 지지격자의 지지성능을 비교 분석하기 위하여 모의 연료봉의 진동시험을 수행하고 있다. 최근에 설계 보완된 이중판 지지격자의 지지성능시험의 일환으로 지지격자체 자체의 진동특성을 파악하기 위하여 수행한 본 연구는 3가지 경계조건에 따라 변하는 5×5 지지격자체의 진동특성을 시험 및 유한요소해석으로 파악하고자 하였다. 모달시험은 해머로 충격 가진하고 가속도계로 데이터를 취득한 후 I-DEAS의 TDAS 모듈로 분석하는 절차로 수행되었다. 지지격자체의 3차원 유한요소모델은 I-DEAS 프로그램으로 작성되었으나 실제 해석은 범용 프로그램인 ABAQUS로 수행되었다. 예상할 수 있는 바와 같이 3셀을 고정한 결과와 2셀을 고정한 결과는 고유진동수에서 약간의 차이를 나타내었다. 자유경계조건에서 얻은 일차 고유진동수는 셀을 고정한 경우보다 대략 2배정도 큰 값을 나타내었다. 시험과 해석으로 얻은 고유진동수는 3가지 경계조건 모두에서 15% ~ 20% 차이를 보였으나 일관성있는 경향을 나타내었으며 모드형상은 대체로 잘 일치하였다. 이중판 지지격자체의 진동모드는 우려했던 40 Hz ~ 60 Hz 대를 훨씬 넘는 115 Hz ~1200 Hz 대의 주파수영역에서 나타났다. 따라서 지지격자 자체의 진동현상이 연료봉의 진동특성을 외곡시키지는 않는 것으로 판단되었다.

Abstract

High performance spacer grid development department in KAERI is carrying out the vibration test for a dummy rod to analyze the support performance of the newly developed spacer grid. The vibration test and analysis for the lately modified Doublet Spacer (DB) grid is performed to understand if the vibration of the DB grid itself has influence on the vibration behavior of the dummy rod. For this study, three kinds of boundary conditions are used such as two-cell clamping and three-cell clamping out of five bottom cells and all free boundary. The vibration

test is executed by typical modal test method that is using an impact hammer and accelerometer, and then analyzing the acquired data. For the FE analysis, I-DEAS modeler is used to build the 3-D FE model of the ND grid and to generate nodes and elements of it. For the numerical calculation, however, ABAQUS is employed. The natural frequency from the analysis and test for the three-cell clamping is a little bit higher than that of two-cell clamping as expected. The fundamental frequency for the all free boundary is almost twice as high as that of two-cell clamping. Although the natural frequency difference between the test and FE model is in the range of 15 % to 20%, the difference and the mode shape are consistent and predictable within all modes. It is judged that the vibration behavior of the DB grid does not lead to any practical effect to the vibration characteristics of the dummy rod that is supported by the DB grid.

1. 서 론

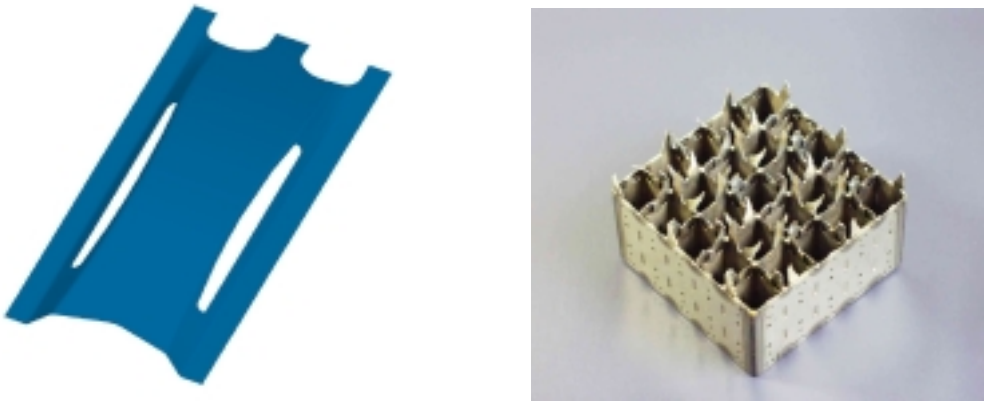
원자력연구소의 고성능지지격자구조기술개발과제는 가압경수로형 핵연료집합체에 이용할 지지격자의 개발과 이와 관련된 기반기술연구를 수행하고 있다. 지금까지 과제를 수행하면서 7종의 지지격자를 개발하여 국내외에 특허 출원하였고, 시편을 제조하여 여러 다양한 기계적시험을 수행하고 있다[1-2]. 이러한 시험의 일환으로 최근에 수정 보완된 이중판 지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동시험을 수행하던 중 몇 개의 모드가 몰려있는 40~60 Hz 사이에서 모의 연료봉의 모드확인을 할 수 없었다[3]. 이러한 현상이 발생하는 원인이 얇은 판을 겹쳐 만드는 이중판 지지격자체 자체의 판 진동모드의 영향 때문일지도 모른다는 판단에 따라 본 연구를 수행하게 된 것이다.

본 연구의 목적은 첫째, 연료봉의 진동특성에 지지격자체가 미치는 영향을 파악하고자 하는 것과, 둘째, 지지격자체의 충격, 좌굴, 진동해석 등에 이용되는 유한요소 전모델(full model)을 진동시험을 통하여 평가해보고자 한 것이다. 진동시험은 충격해머로 가진하고 가속도계로 신호를 취득하고 분석하는 전통적인 모달시험방법으로 수행되었고 취득된 신호는 분석 소프트웨어로 널리 사용되고 있는 TDAS[4]를 이용하여 분석되었다. 3차원 유한요소 해석모델은 I-DEAS를 이용하여 만들어 요소망을 생성한 후 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS[5]파일로 변환 된 후 실제 수치해석이 수행되었다. 해석과 시험에 사용한 경계조건은 바닥면의 2셀 고정조건, 3셀 고정조건 그리고 자유경계조건 등 3가지 이었다.

2. 시험시편 및 해석모델

새 이중판 지지격자는 2000년도에 미국특허를 취득한 이중판 노즐형 지지격자에 기초하여 개발된 것으로서 연료봉을 지지하는 스프링 강성을 완화시킨 것이다. 스프링 강성의 완화책으로서 스프링 양편에 슬롯(slot)을 두어, 스프링 강성을 완화시키고 접촉면에서의 마멸특성도 향상시킨

모델이다. 새 이중판 지지격자의 단위 셀과 5×5형 격자체의 형상은 다음의 그림 1과 같다.



(가) 단위셀 (나) 5×5 이중판 지지격자체

그림 1. 이중판 지지격자 단위셀과 5×5로 제작된 지지격자체

진동시험에 사용된 이중판 지지격자는 9.5 mm 외경의 핵연료봉이 삽입된다고 가정하고 모든 치수가 결정되었고, 실제와 같이 Zircaloy-4 판재로 제작되었다. 새이중판 지지격자체의 두께는 내부판이 0.35 mm 이며 외부판이 0.457 mm 이다.

유한요소해석을 위한 3차원 모델은 I-DEAS로 만들어졌으나 실제 해석은 ABAQUS에서 수행되었다. 해석에 사용한 요소는 4절점 탄소성 쉘요소(S4R)이었으며 약 19600개의 요소가 이용되었다. 5×5 이중판 지지격자체의 3차원 유한요소해석 모델은 다음의 그림 2와 같다.

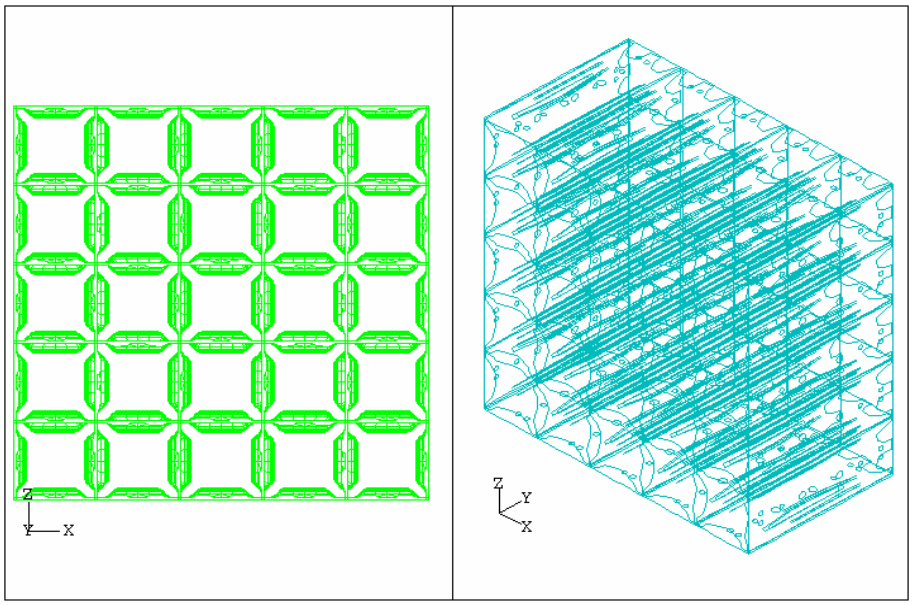


그림 2. 5×5 이중판 지지격자체의 3차원 유한요소해석

해석의 경계조건은 최대한 시험조건과 유사하게 구현하고자 하였으나 Y방향의 구속조건이 정확히 동일하지않다. 실제시험에서 지지격자체의 하단부 바닥면은 강체인 베드에 접해 있기 때문에 –Y 방향의 변위는 완전히 구속된다고 볼수 있으나 +Y 방향의 변위는 엄밀히 말해 완전히 구속되지 않는다. 반면 해석에서는 +Y/–Y 양 방향 변위를 완전히 구속할 수 밖에 없었다. 경계조건 중 하부 3셀을 고정한 모습을 다음의 그림 3에 보인다. 진동해석에 사용한 기본적인 물성은 탄성계수 108.3 GPa, 밀도 6600 kg/m^3, 프와송비 0.294 이었다.

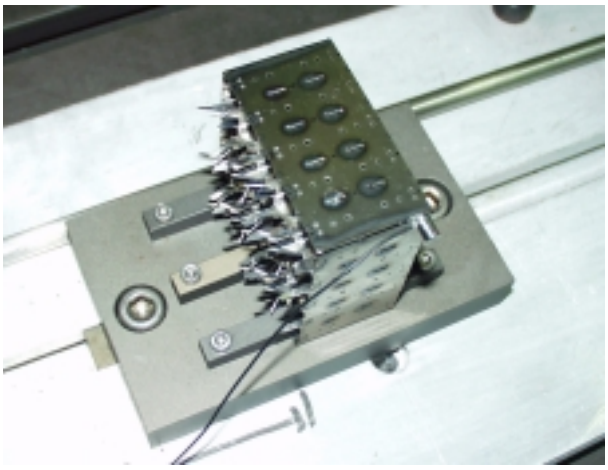


그림 3. 시험을 위해 하부3셀을 고정한 이중판 지지격자체

3. 시험 및 해석 결과

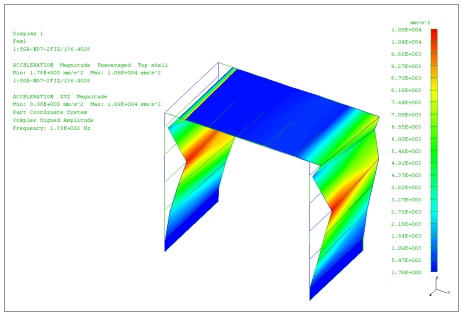
설정한 0~1300 Hz 측정범위내에서 5개의 고유모드를 확인할 수 있었다. 시험으로 확인한 고유진동수와 유한요소해석으로 얻은 고유진동수를 1~5차까지 경계조건별로 나타내면 표 1과 같다.

표 1 경계조건별 1차~5차까지 고유진동수

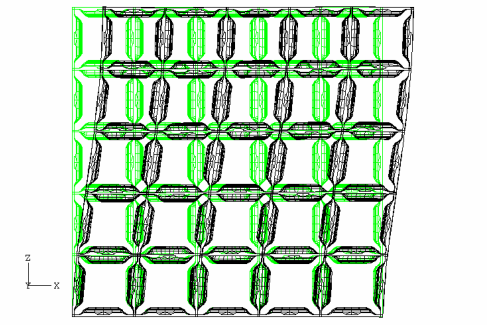
B.C. / Mode	진동수(Hz)					
	2셀 고정		3셀 고정		자유경계	
	시험	수치해석	시험	수치해석	시험	수치해석
1	136.40	115.8	137.40	116.0	275.89	239.3
2	524.39	434.9	526.40	435.7	547.91	531.4
3	739.92	782.4	780.80	784.5	693.58	550.3
4	1036.8	855.2	1044.0	856.6	900.10	853.0
5	1250.7	993.0	1256.4	993.2	1136.8	1039.6

시험으로 얻은 값중 하단부 2셀을 고정하는 경우, 일차 고유진동수는 136.4 Hz를 나타내었고, 3셀을 고정한 경우는 이보다 다소 큰 137.4 Hz를 나타내었으며 자유경계조건의 경우는 약 240 Hz를 나타내었다. 3셀을 고정한 경우 2셀을 고정한 경우에 비하여 다소 높은 값을 나타내었으나 그 차이는 생각보다 크지않았다. 반면 자유경계조건에서 시험한 경우 일차 고유진동수는 셀을 고정한 경우보다 대략 두 배이상 컸으나 2차 이후 고차모드에서는 큰 차이를 나타내지않았다.

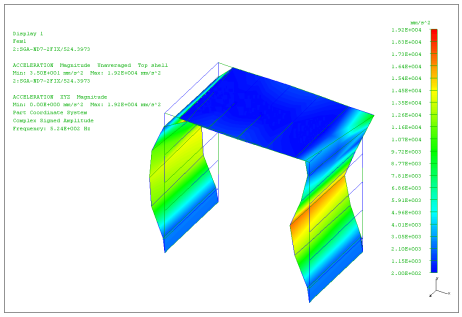
마찬가지로 모드형상도 셀을 고정한 수에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 2셀을 고정한 경우 시험과 해석으로 얻은 모드형상을 그림 4에 비교 도시하였다.



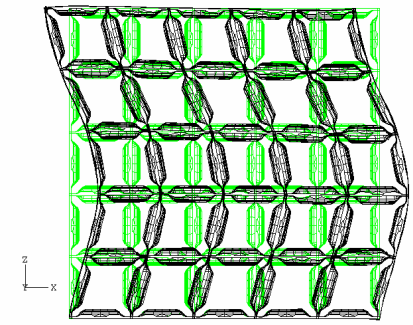
(1) 시험 모드형상 1차



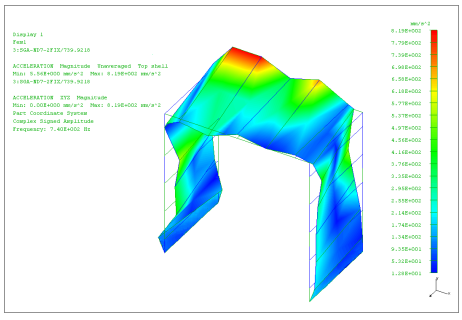
(2) 해석 모드형상 1차



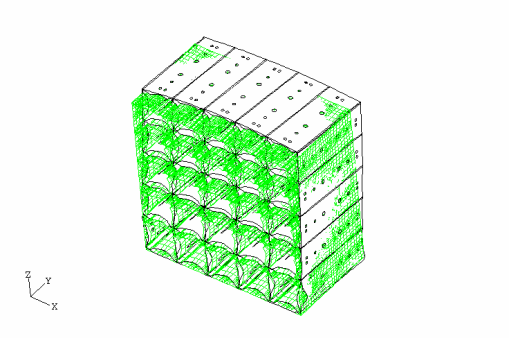
(3) 시험 모드형상 2차



(4) 해석 모드형상 2차

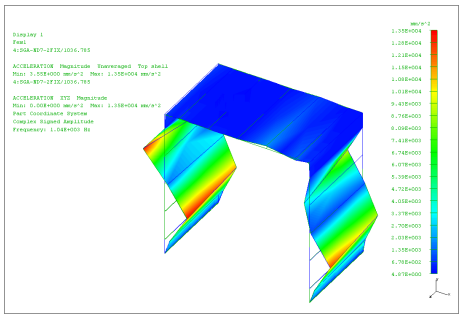


(5) 시험 모드형상 3차

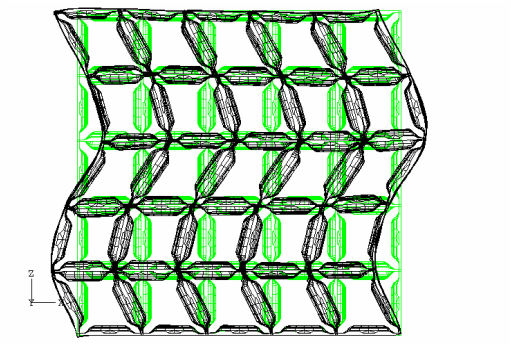


(6) 해석 모드형상 3차

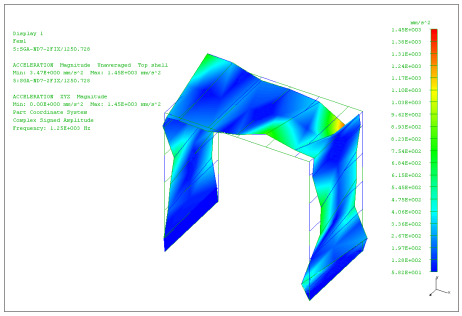
그림 4. 2셀을 고정한 경우 시험과 해석으로 얻은 모드형상 비교



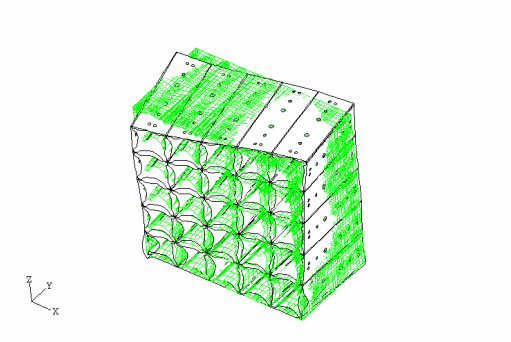
(7) 시험 모드형상 4차



(8) 해석 모드형상 4차



(9) 시험 모드형상 4차

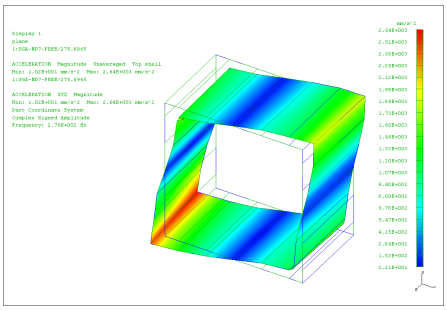
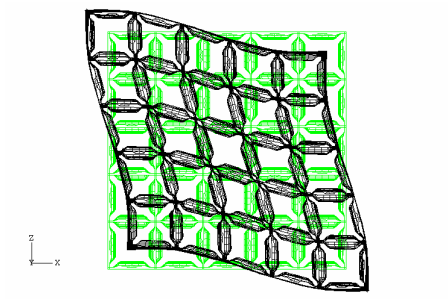


(10) 해석 모드형상 4차

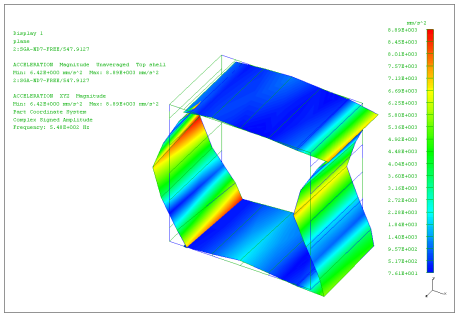
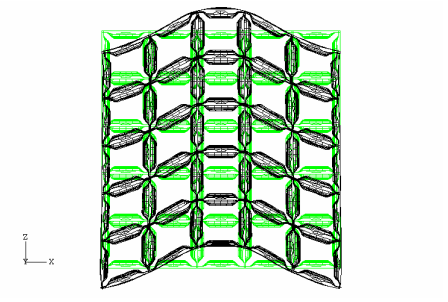
그림 4. 2셀을 고정한 경우 시험과 해석으로 얻은 모드형상 비교(계속)

시험과 해석으로 얻은 모드형상은 유사하였다. 1차, 2차 및 4차 모드는 전형적으로 나타나는 굽힘모드로서 처음에는 고정된 바닥면에 대향하는 상면의 상대직진운동 모드이고, 2차모드는 길이 방향으로 반파가 나타나는 전형적인 굽힘모드이며, 3차 모드는 반파에 이어 나타나는 완파 굽힘모드이다. 3차 모드는 1차와 다른 방향으로 상대직진운동하는 굽힘모드의 일종으로 판단되었으며 5차 모드는 전형적인 비틀림 모드이었다.

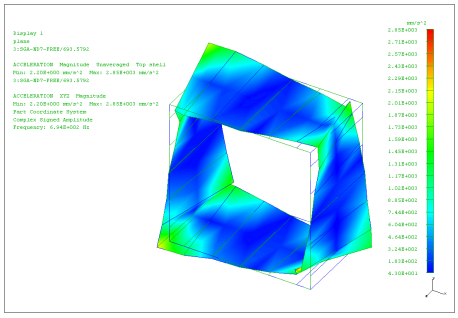
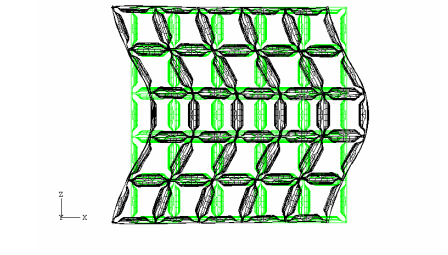
자유 경계조건에서 얻은 모드형상을 다음의 그림 5에 비교 도시하였다. 시험과 해석으로 얻은 1차 및 2차 모드형상들은 대체로 잘 일치하였다. 1차 모드는 지지격자체가 대각선 모서리 방향으로 찌그러지는 모드이며 2차모드는 한면의 가운데가 돌출하는 모드이었다. 해석에서 얻은 3차 모드는 2차 모드가 방향만 바꾼 대칭모드로 판단되었다. 이것은 지지격자체 용접부분의 비대칭성과 내부격자판에 있는 슬롯형태의 비대칭성으로 인해 발생한 것으로 추정된다. 따라서 고유진동수가 다소 차이가 나면서 방향을 달리하는 동일한 모드가 나타난 것으로 판단된다. 그렇지만 시험에서는 이러한 모드를 확인할 수 없었다. 시험의 3차 모드와 해석의 4차 모드는 비틀림모드로서 변형 형상과 고유진동수로 판단할 때 동일한 모드로 간주할 수 있다. 해석의 5차 모드와 시험의 4차 모드는 변형 형태와 고유진동수로 판단할 때 동일한 모드인 것으로 판단되었다.

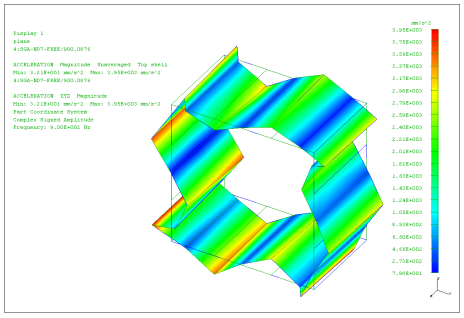
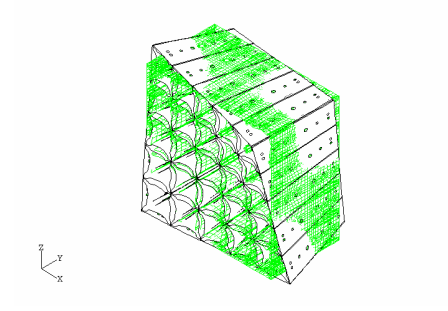
(가) 1차 모드

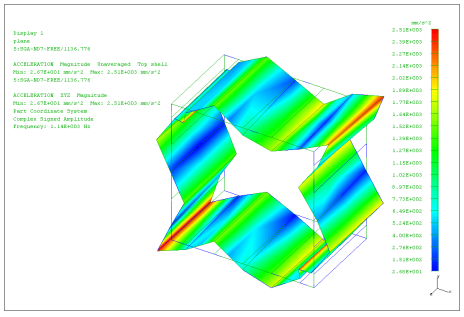
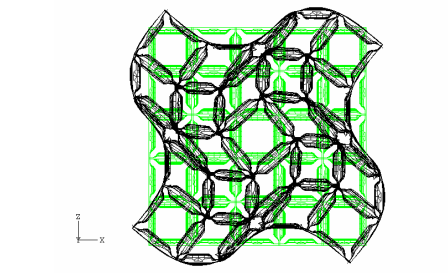
(나) 2차 모드

(다) 3차 모드

(라) 4차 모드

(마) 5차 모드

그림 5 자유경계조건에서 시험(좌)과 해석(우)의 모드형상 비교

4. 결 론

새로운 이중판 지지격자로 지지된 모의 연료봉의 진동시험을 수행하던 중 지지격자체 자체의 진동특성을 파악하기 위하여 수행한 본 연구는 3가지 경계조건에 따라 변하는 5×5 지지격자체의 진동특성을 시험 및 유한요소해석으로 파악하고자 하였다. 모의 연료봉의 진동시험과 같이 하부 2셀 혹은 3셀을 고정한 경계조건에서 얻은 이중판 지지격자체의 모드는 우려했던 40 Hz ~ 60 Hz 대를 훨씬 넘는 115 Hz ~1200 Hz 대의 주파수영역에서 나타났다. 모의 연료봉의 진동 특성이 지지격자체의 지지구조(스프링 딤플의 설계형상 및 강성)에 의하여 크게 영향을 받는 것은 사실이지만[6] 지지격자 자체의 진동현상이 연료봉의 진동특성을 외곡시키지는 않는 것으로 나타났다.

시험과 해석에 적용한 3가지 경계조건 모두에서 대략 15 % ~ 20 %의 고유진동수 차이를 나타내었으며 모드형상의 경우도 만족스러운 결과를 보여주었다. 다만 자유경계조건의 경우, 유한요소해석은 2차와 3차 모드가 설정된 축을 달리하여 20 Hz 정도의 차이로 나타난다고 예측하였으나 시험에서는 3차 대칭모드가 나타나지않았다. 따라서 3차모드 후에 나타나는 해석의 4차모드는 시험의 3차모드와 해석의 5차모드는 시험의 4차모드와 그리고 해석의 6차모드는 시험의 5차모드와 동일한 것으로 판단되었다.

본 연구에 이용한 유한요소모델은 고성능지지격자개발과제에서 충격 및 좌굴 해석을 위해 개발한 모델을 일부 수정한 것이다. 연구에 이용한 유한요소 전모델(full model)은 시험결과 보다 다소 낮게 고유진동수를 예측하였지만 모든 경우에서 일관성을 유지하였을 뿐 아니라 예측된 모드형상은 시험결과와 대체로 잘 일치하였다. 계산된 고유진동수가 다소 낮은 것은 실제 판과 판사이에서 발생하는 마찰의 영향을 엄정히 반영할 수 없는 것이 주요한 원인인 것으로 추정되었다. 개발된 유한요소모델은 향후 진동해석에 유용하게 사용될 수 있을 뿐아니라 몇 번의 검증을 거치면 충격 및 좌굴해석에도 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

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. 최명환 외 4인, 2002, “최적화 H형 및 새이중판 지지격자로 연속 지지된 모의 연료봉의 진동해석”, KAERI/TR-2063/2002, 한국원자력연구소.

4. SDRC, 2002, "I-DEAS Master Series 9.0", Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
5. H.D. Hibbit, G.I. Karlsson and E.P. Sorensen, 2001, "ABAQUS/Standard User's Manual", Ver. 6.3, HKS Inc., RI, USA
6. 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.