

경수로용 핵연료집합체 지지격자의 좌굴특성에 관한 연구

A Study on the Buckling Characteristics of Spacer Grid in PWR Fuel Assembly

전상운, 전경락, 장영기, 김용환, 김규태

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

본 연구에서는 경수로용 핵연료집합체의 전체지지격자와 부분지지격자에 대한 정적 좌굴강도시험과 부분지지격자에 대한 정적 좌굴해석을 수행하여 지지격자의 좌굴특성을 분석하였으며, 분석결과를 이용하여 전체지지격자에 대한 좌굴하중값의 예측 가능성을 평가하였다. 좌굴강도시험은 웨스팅하우스형 연료의 17X17 셀을 갖는 전체지지격자와 1X1, 1X2, 1X3, ..., 1X17, 2X1, 2X2, ..., 2X17, 3X17 등의 셀을 갖는 부분지지격자에 대하여 수행하였으며, 시험결과를 이용하여 부분지지격자의 좌굴강도와 전체지지격자의 좌굴강도 사이의 관계를 평가하였다. 좌굴강도해석은 범용 유한요소해석코드인 ANSYS 5.6[3]을 이용하여 웨스팅하우스형 17X17 및 한국표준형 개량연료 16X16 지지격자에 대하여 수행하였으며, 해석결과를 이용하여 지지격자의 좌굴특성을 분석하고 시험결과와 비교하였다.

Abstract

This study contains the buckling tests and finite element analysis for small size grid samples and full size spacer grids. The buckling tests and finite element analysis were performed to evaluate the buckling characteristics of PWR spacer grids. The buckling tests were performed for the full size spacer grids and small size grid samples having several different number of rows and columns of grid. Eigenvalue buckling analyses were performed by a finite element method using ANSYS program and the results were compared with experimental test results. Based on the test and analysis results, the correlation between the buckling strength of the full size spacer grid and that of small size grid samples were evaluated.

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체의 지지격자는 상하단고정체를 구조적으로 연결하고 있는 안내관에 조립되어 핵연료집합체의 전 수명기간동안 연료봉을 축방향 및 횡방향으로 지지하고, 연료봉의 횡방향 간격을 일정하게 유지하여 핵연료의 냉각성을 유지시키는 기능을 하는 구조부품이다. 지지격자체는 스프링과 덤플이 성형가공 되어 있는 여러 개의 판을 서로 교차되게 조립하고 교차점에서 용접으로 결합된 형태로 구성되어 있으며 각 셀에 삽입되어 있는 연료봉을 스프링과 덤플의 조합에 의해 지지하고 있다[1].

원자력발전소 부지에서의 지진(SSE, Safe Shutdown Earthquake) 및 원자로냉각재계통 배관에서의 냉각재상실사고(LOCA, Loss Of Coolant Accident)와 같은 사고시 발생하게 되는 외력이 원자로냉각재계통에 작용하게 되면 핵연료집합체에도 어떠한 형태의 외력이 작용하게 되며, 이러한 사고에 대해서 원자로 노심에 장전되어 있는 집합체에 대한 구조적 건전성 분석을 요구하고 있다. 안전심사지침(SRP, Standard Review Plan) 4.2 절[2]에서는 발생 확률이 낮은 지진 및 냉각재상실사고와 같은 외력에 대한 노심내의 핵연료집합체 구조응답에 대한 해석을 통해 지진 및 냉각재상실사고와 같은 외력하에서도 핵연료계통의 냉각성이 유지되어야 하며 노심의 손상정도가 제어봉을 삽입할 수 없을 만큼 심하면 안된다고 규정하고 있다. 이를 위해 지진 및 냉각재상실사고에 대한 집합체 구조해석으로부터 얻어진 하중을 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 방법으로 합한 지지격자 조합하중이 지지격자의 충격시험으로부터 구한 허용하중보다 작음을 확인하여야 한다.

이러한 충격하중을 받고 있는 지지격자에 대한 설계검증을 위해 전체지지격자를 이용한 충격시험을 수행하고 있으며 새로운 지지격자 설계시에는 최종설계를 확정하기 전 제안된 여러가지 형태의 지지격자에 대한 충격강도 만족여부를 확인하기 위해서 전체지지격자를 제작하여 좌굴시험이나 충격시험을 수행하여야 한다. 전체지지격자를 제작하기 위해서는 시간과 경비가 많이 소요되며 개발기간 중 다른 설계분야와의 연계업무 등을 고려하면 전체지지격자의 일부분을 제작한 부분지지격자에 대한 시험결과를 이용하거나 혹은 부분지지격자에 대한 좌굴해석 결과를 이용하여 전체지지격자에 대한 좌굴강도 혹은 충격강도를 예측할 필요성이 있다.

본 연구에서는 경수로용 핵연료집합체의 전체지지격자와 부분지지격자에 대한 좌굴강도시험과 부분지지격자에 대한 좌굴해석을 수행하여 지지격자의 좌굴특성을 분석하였으며, 분석결과를 이용하여 전체지지격자에 대한 좌굴강도값의 예측 가능성을 평가하였다. 좌굴강도시험은 웨스팅하우스형 연료의 17X17 셀을 갖는 전체지지격자와 1X1, 1X2, 1X3, ..., 1X17, 2X1, 2X2, ..., 2X17, 그리고 3X17 등의 셀을 갖는 부분지지격자에 대하여 수행하였으며, 시험결과를 이용하여 부분지지격자의 좌굴강도와 전체지지격자의 좌굴강도 사이의 관계를 평가하였다. 좌굴강도해석은 범용 유한요소해석코드인 ANSYS 5.6[3]을 이용하여 수행하였으며, 해석결과를 이용하여 지지격자의 좌굴특성을 분석하고 시험결과와 비교하였다.

2. 사각판의 좌굴하중

내평면력 N_x , N_y , 그리고 N_{xy} 를 받고 있는 사각판에 대한 미분방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

단순지지된 사각판이 일축 내평면력 N_x 를 받는 경우에는 $N_y = N_{xy} = 0$ 으로 놓으면 (1)식으로 표현된 판의 굽힘에 대한 미분방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

(2)식의 해를 구하므로써 단순지지된 사각판의 최소 임계하중인 좌굴하중을 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$(N_x)_{cr} = \frac{4\pi^2 D}{b^2} \quad (3)$$

여기서, $(N_x)_{cr}$: Critical Compressive Load per Unit Distance,

D : Flexural Rigidity, E : Elastic Modulus, ν : Poisson's Ratio

b : Width of the Plate, t : Thickness of the Plate,

상기 식은 일축 내평면력을 받고 있는 단순지지 사각판에 대해 적용가능한 식으로 지지격자 판의 경우 기하학적 형상과 경계조건이 앞에서 제시한 식에서 고려된 사각판의 경우와 차이가 있다. 지지격자판에는 스프링과 댐퍼를 위한 여러 개의 구멍(windows)과 조립을 위한 슬롯(slots)이 존재한다. 또한, 지지격자에서 지지격자판에 대한 경계조건은 단순지지와 고정 경계조건의 조합이라고 할 수 있을 것이다. 따라서, 상기 식은 지지격자의 좌굴문제에 직접 적용할 수는 없으나 상기 식으로부터 좌굴하중은 지지격자판 두께의 3승에 비례하고 지지격자판 폭의 2승에 반비례할 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 지지격자판의 기하학적 형상과 경계조건을 복잡성을 감안하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.6을 이용하여 지지격자판에 대한 좌굴하중을 계산하였으며 계산결과를 정적 좌굴시험 결과와 비교하였다.

3. 지지격자 좌굴시험

지지격자에 대한 좌굴특성을 분석하기 위하여 전체지지격자와 부분지지격자에 대한 시편을 제작하여 정적 좌굴시험을 수행하였다. 지지격자 시편은 웨스팅하우스형 17X17 지지격자를 사용하였으며 5개의 전체지지격자와 50개의 부분지지격자에 대한 시편을 제작하였다. 표 1에 시험을 위해 제작된 전체지지격자와 부분지지격자의 종류와 수량을 나타내었으며 그림 1에서 정적 좌굴시험을 위해 시험장비에 지지격자 시편을 장착한

형상을 보여 주고 있다. 전체지지격자와 부분지지격자의 형상을 그림 2에 나타내었으며 지지격자 판에 대한 재료물성치를 표 2에 나타내었다. 지지격자에 대한 정적좌굴시험은 만능재료시험기를 이용하여 지지격자에 압축하중을 가하면서 하중-변위 곡선을 측정하여 최대압축하중을 지지격자의 좌굴하중으로 하였으며 측정된 좌굴하중을 표 3에 종합하여 나타내었고 좌굴모양을 그림 2에 나타내었다. 그림 3에서 동일한 개수의 행을 갖는 부분지지격자에 대한 좌굴하중을 열의 개수의 함수로 나타내었으며 그림 4에 17개의 열을 갖는 부분지지격자에 대한 좌굴하중을 행의 개수의 함수로 나타내었다.

4. 지지격자 좌굴해석

지지격자를 구성하는 셀의 수직(행) 및 수평(열)방향의 수가 지지격자의 좌굴하중에 미치는 영향을 평가하기 위하여 두가지 형태의 지지격자에 대한 정적 좌굴해석을 수행하였다. 좌굴해석은 ANSYS 5.6을 이용하여 수행하였으며 해석에 사용된 지지격자판의 기하학적 형상과 치수를 그림 5에 나타내었다. 좌굴해석을 위한 모델은 행과 열의 수가 서로 다른 지지격자를 모사하기 위하여 하중을 받는 방향과 수직 및 수평방향으로 셀의 수를 1개에서 5개까지 추가하여 각각 5종류의 모델을 생산하였다. 해석모델에서 사용한 요소는 4개의 절점을 갖는 사각 탄성 셀요소(SHELL63)이며 웨스팅하우스형 17X17 지지격자모델에서 각 셀을 1,773개의 절점과 1,545 개의 요소로 구성하였고 한국표준형 개량연료인 16X16 지지격자모델에서는 각 셀은 2,106개의 절점과 1,854 개의 요소로 구성하였다. 그림 6에 좌굴해석에 사용된 17X17형 및 16X16형 부분지지격자 판 모델의 형상과 경계조건을 보여 주고 있다. 지지격자에 대한 좌굴하중을 구하기 위하여 앞에서 생산된 모델을 이용하여 좌굴해석을 수행하였으며 표 4에 해석결과인 여러가지 크기의 지지격자에 대한 좌굴하중값을 나타내었다. 그림 3과 4에서는 17X17형 및 16X16형 지지격자에 대한 좌굴하중을 열의 개수와 행의 개수의 함수로 좌굴시험결과와 비교하여 나타내었으며 해석모델에 대한 17X17형 및 16X16형 지지격자의 좌굴모드를 그림 7과 8에 각각 나타내었다.

5. 결과 및 토의

5.1 지지격자 셀 개수의 영향

그림 3에서 각각 1개와 2개의 행을 갖는 부분지지격자에 대한 좌굴하중 값을 시험결과와 해석결과를 비교하여 열의 개수의 함수로 나타내었다. 그림에서 같은 수의 행을 갖는 지지격자에 대한 좌굴하중 값은 열의 수에 선형적으로 비례하여 증가함을 알 수 있으며, 같은 수의 열을 갖는 지지격자에 대한 좌굴하중 값은 행의 수의 누승에 반비례하여 감소하는 것으로 나타났다. 그림 4에서는 17개의 열을 갖는 부분지지격자에 대한 좌굴하중을 시험결과와 해석결과를 비교하여 행의 개수의 함수로 나타내었다. 그림에서 동일한 열의 개수를 갖는 지지격자의 좌굴하중에 미치는 행의 개수의 영향은

행의 개수가 작은 경우에 매우 민감하며 행의 개수가 증가할수록 그 영향은 감소되는 경향을 보였으며 지지격자에 대한 좌굴하중 값이 행의 수 증가에 반비례 하지 않게 되는 것이 영역이 있는 것으로 나타났다.

5. 2 지지격자 좌굴모양

좌굴시험결과인 17X17 형 전체 및 부분지지격자에 대한 좌굴모양을 그림 2 에 나타내었으며 좌굴해석결과인 17X17 형 및 16X16 형 지지격자 해석모델에 대한 좌굴모양을 그림 7 과 8 에 각각 나타내었다. 1 개의 행을 갖는 부분지지격자(1X1, 1X2, 1X3, 1X4, 1X5)와 2 개의 행을 갖는 부분지지격자(2X1, 2X2, 2X3, 2X9)의 좌굴모양은 그림 2 와 그림 7 및 8 에서 1 개의 행과 2 개의 행을 갖는 지지격자 해석모델의 1 차 좌굴모양과 동일한 것으로 나타났다. 1 개의 행과 17 개의 열을 갖는 1X17 부분지지격자의 좌굴모양도 1 개의 행을 갖는 다른 부분지지격자(1X1, 1X2, 1X3, 1X4, 1X5)와 동일할 것으로 판단되었으나 1X17 부분지지격자에 대한 좌굴시험시 지지격자의 상부 끝단에서 수평방향의 미끄럼 현상이 발생하여 충분히 지지되지 않았으며, 결과적으로 좌굴하중이 감소하였고 좌굴모양도 다르게 나타났다. 전체지지격자에 대한 3 가지의 서로 다른 형태의 좌굴모양을 그림 2 에서 보여 주고 있다. 그림에서 좌굴모양 1, 2, 3 에 대한 좌굴하중은 각각 1,965 lbs, 1,771 lbs, 1,452 lbs 로 나타났으며 좌굴시험에 사용된 대부분의 전체지지격자는 좌굴모드 3 과 같은 모양으로 좌굴이 발생하였다. 전체지지격자에 대한 좌굴모드 3 은 양단에서 고정된 경계조건을 갖는 보의 좌굴모드와 유사하게 나타났다. 그리고, 전체 지지격자에 대한 좌굴하중은 지지격자가 좌굴모드 3 으로 좌굴되었을 때가 가장 낮은 값으로 나타났으며 이는 좌굴모드 3 의 경우가 보의 좌굴모드와 유사한 것에 기인하는 것으로 평가되었다. 이와 같은 시험결과와 해석결과를 근거로 할 때 지지격자의 좌굴하중은 각 지지격자에 대한 좌굴모드와 함께 고려되어야 할 것으로 평가되었다.

5. 3 좌굴하중의 예측

지지격자에 대한 좌굴시험과 좌굴해석 결과로부터 전체지지격자에 대한 좌굴하중과 부분지지격자에 대한 좌굴하중의 관계가 그림 3 과 4 에서와 같이 나타났다. 그림 3 에서 동일한 수의 행으로 구성되고 여러 개의 열을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중은 행의 수가 동일한 단위 셀을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중을 이용하여 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고, 그림 4 에서와 같이 동일한 수의 열로 구성되고 여러 개의 행을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중도 열의 수가 동일한 단위 셀을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중을 이용하여 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 전체지지격자에 대한 좌굴하중은 부분지지격자에 대한 좌굴하중과 해석결과로부터 예측이 가능한 것으로 나타났으며, 지지격자 설계를 개선하는 경우나 새로운 지지격자를 개발하는 경우 제안된 여러가지 설계로부터 좌굴강도 성능을 만족할 수 있는 설계를 선정할 때 유용하게 사용될 수 있는 것으로 평가되었다.

6. 결 론

경수로용 핵연료집합체의 전체지지격자와 부분지지격자에 대한 정적 좌굴강도시험과 부분지지격자에 대한 정적 좌굴해석을 수행하여 지지격자의 좌굴특성을 분석하였으며, 분석결과를 이용하여 전체지지격자에 대한 좌굴하중값의 예측 가능성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 동일한 수의 행을 갖는 지지격자에 대한 좌굴하중값은 열의 수에 선형적으로 비례하고 동일한 수의 열을 갖는 지지격자에 대한 좌굴하중값은 행의 수의 누승에 반비례하는 것으로 나타났다.
- 부분지지격자의 좌굴모양은 행의 수가 동일한 경우 열의 수에 관계없이 동일한 것으로 나타났다.
- 여러 개의 열을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중은 행의 수가 동일한 단위 셀을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중을 이용하여 예측할 수 있으며, 여러 개의 행을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중도 열의 수가 동일한 단위 셀을 갖는 부분지지격자의 좌굴하중을 이용하여 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서, 전체지지격자에 대한 좌굴하중은 부분지지격자에 대한 좌굴하중과 해석결과로부터 예측이 가능한 것으로 나타났으며, 지지격자 설계를 개선하는 경우나 새로운 지지격자를 개발하는 경우 제안된 여러가지 설계로부터 좌굴강도 성능을 만족할 수 있는 설계를 선정할 때 유용하게 사용될 수 있는 것으로 평가되었다.

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 한국표준원전용 개량핵연료개발 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Fuel Design Report for 17x17 Fuel Assembly, 1994, KNFC
- [2] USNRC Standard Review Plan Section 4.2 Appendix A, "Evaluation of Fuel Assembly Structural Response to Externally Applied Forces", 1981, USNRC
- [3] ANSYS Rev. 5.6, Swanson Analysis System Inc.
- [4] A.C.Ugural, Stresses in Plates and Shells, McGraw-Hill, 1981

표 1. 좌굴시험용 지지격자의 종류 및 수량

지지격자의 종류		수량 (개)
부분지지격자	1 ROW (1X1, 1X2, 1X3, 1X4, 1X5, etc.)	26
	2 ROW (2X1, 2X2, 2X3, 2X9, etc.)	20
	3 ROW (3X17)	4
전체지지격자	17 ROW (17X17)	5

표 2. 지지격자판의 재료물성치

항 목	값
Young' s Modulus (at 70°F, psi)	14.3 X 10 ⁶
Posion Ratio	0.3
Yield Strength, 0.2% (Minimum, psi)	43,000
Ultimate Tensile Strength (Minimum, psi)	55,000

표 3. 지지격자 좌굴시험 결과

시편종류	좌굴하중 (lbf)	시편종류	좌굴하중 (lbf)
1X1	659	2X1	304
1X2	982	2X2	448
1X3	1,315	2X3	654
1X4	1,634	2X9	1,697
1X5	1,931	2X17	3,509
1X17	4,577	3X17	2,663
-	-	17X17	1,618

(주) 좌굴하중값은 3~5개의 시편에 대한 평균값임.

표 4. 지지격자판에 대한 좌굴해석 결과

(a) 17X17형 지지격자판

수직방향 지지격자판 수량	좌굴하중 (lbf)			수평방향 지지격자판 수량	좌굴하중 (lbf)	
	모드 1	모드 2	모드 3		1 행	2 행
1	416.68	920.52	1206.4	1	416.68	199.29
2	199.29	535.21	598.47	2	833.36	398.72
3	178.35	195.03	438.85	3	1250.04	598.15
4	169.39	187.85	197.52	4	1666.72	797.16
5	149.04	168.99	190.64	5	2083.40	996.45

(b) 16X16형 지지격자판

수직방향 지지격자판 수량	좌굴하중 (lbf)			수평방향 지지격자판 수량	좌굴하중 (lbf)	
	모드 1	모드 2	모드 3		1 행	2 행
1	459.66	990.75	1390.2	1	459.66	203.07
2	203.07	588.63	679.38	2	919.32	406.14
3	165.11	192.35	526.42	3	1378.98	609.21
4	154.48	175.31	201.30	4	1838.64	812.28
5	145.95	162.89	193.06	5	2298.30	1015.35

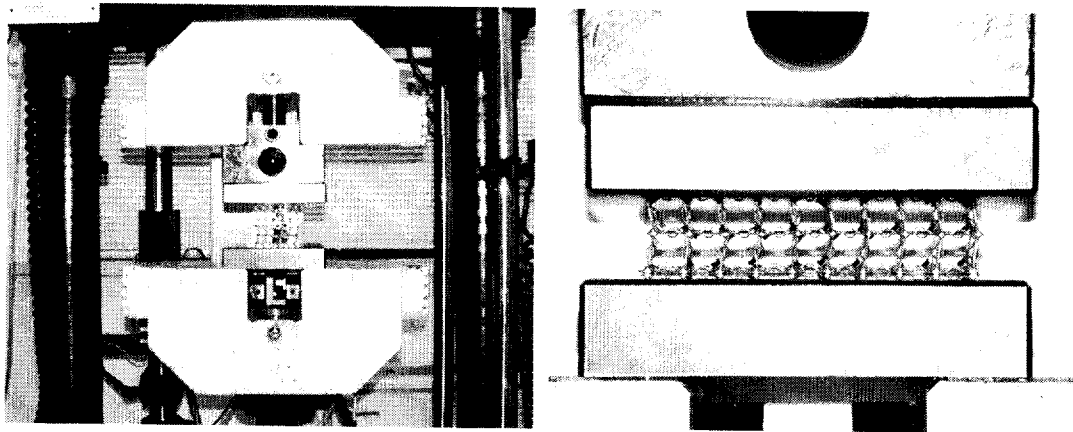


그림 1. 지지격자 좌굴시험 형상

(1X1)	(1X2)	(1X3)	(1X4)	(1X5)
(2X1)	(2X2)	(2X3)	(2X9)	
(1X17)	(2X17)	(3X17)		
좌굴모드 1	좌굴모드 2	좌굴모드 3		
(17X17)				

그림 2. 지지격자 시편형상 및 좌굴모양

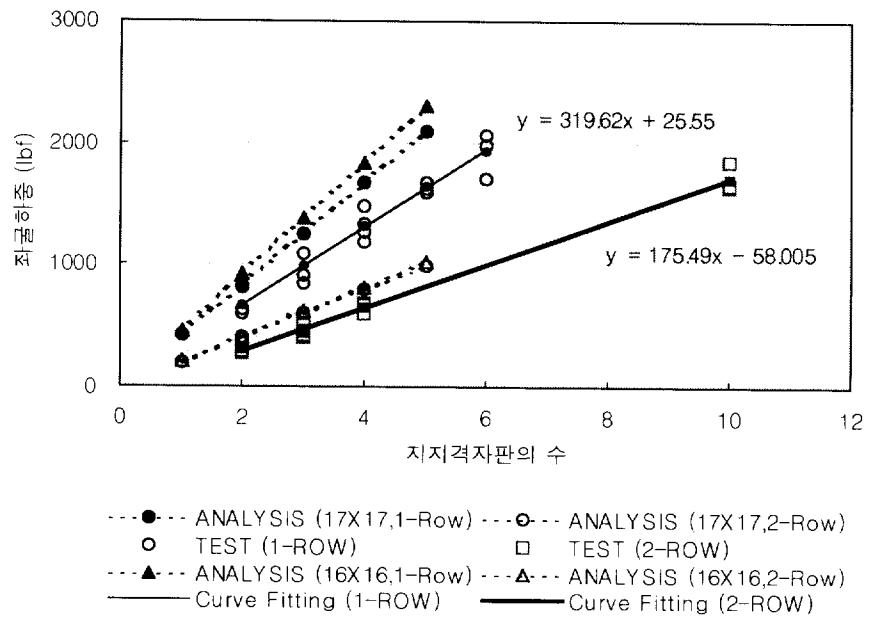


그림 3. 열의 수 증가에 따른 지지격자 좌굴하중
(지지격자판의 수 = 열의 수 + 1)

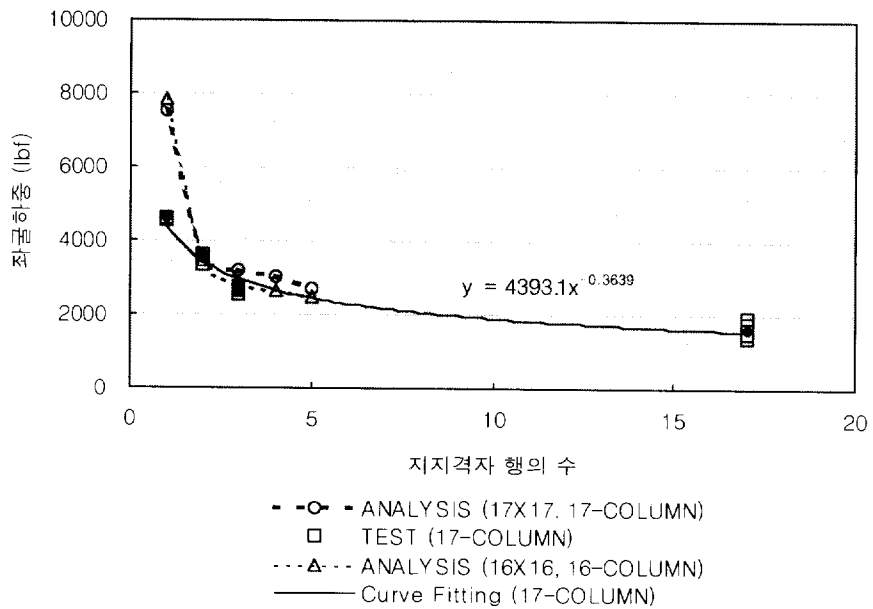
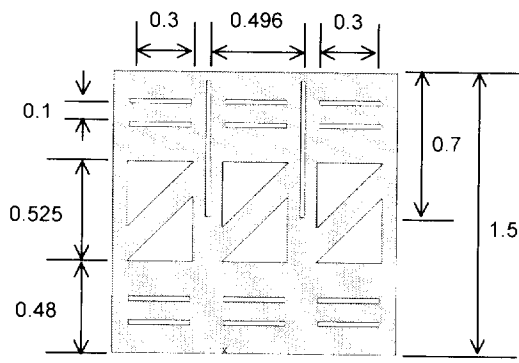
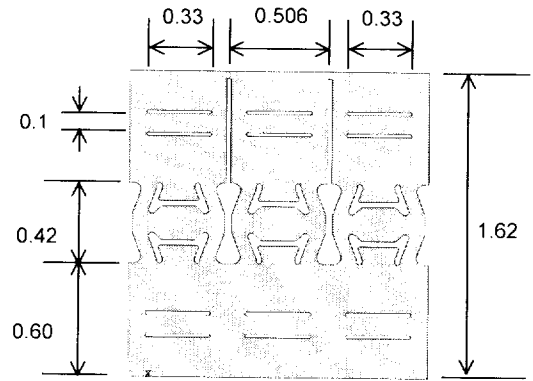


그림 4. 행의 수 증가에 따른 지지격자 좌굴하중

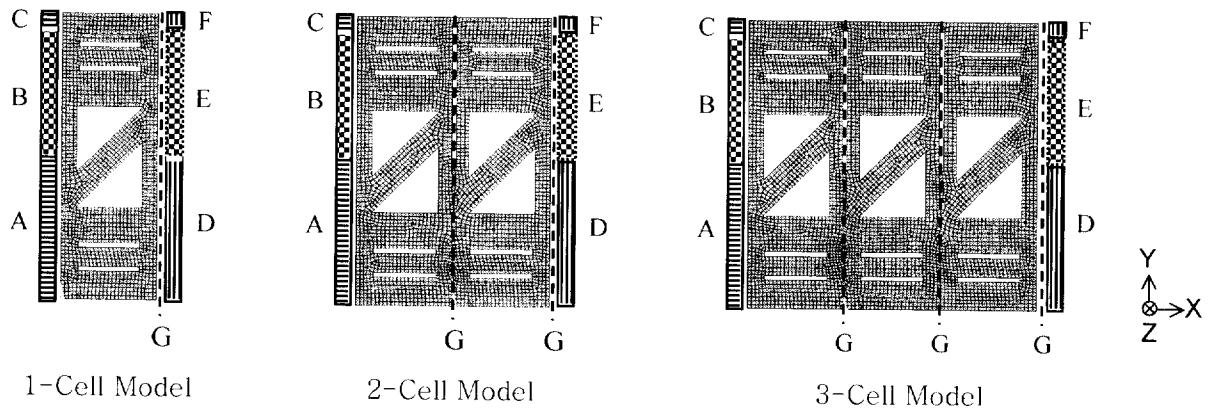


(a) 17X17형 지지격자판

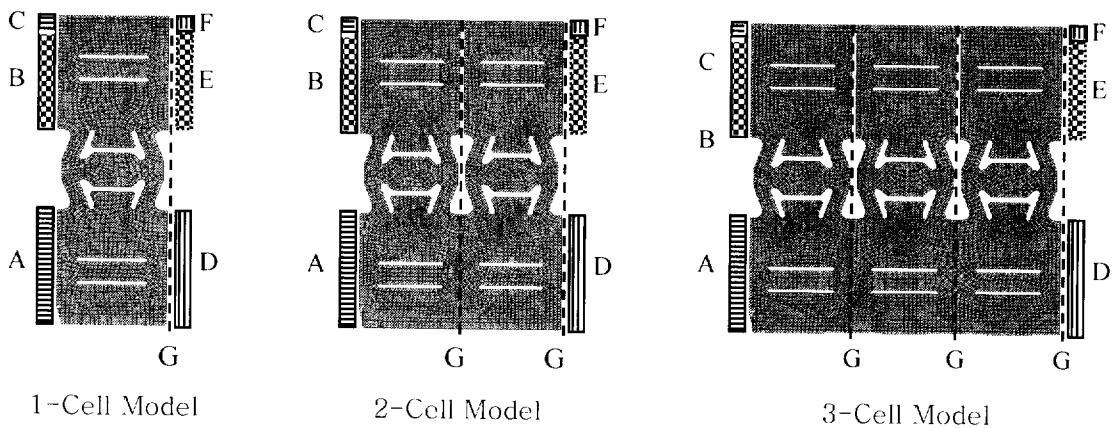


(b) 16X16형 지지격자판

그림 5. 지지격자판 모델의 형상 및 치수 (단위 : inches)



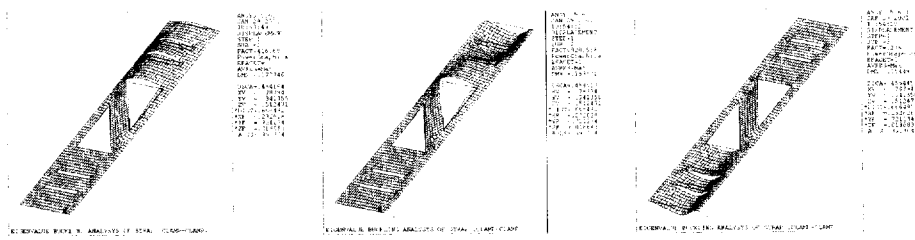
(a) 17X17형 지지격자판



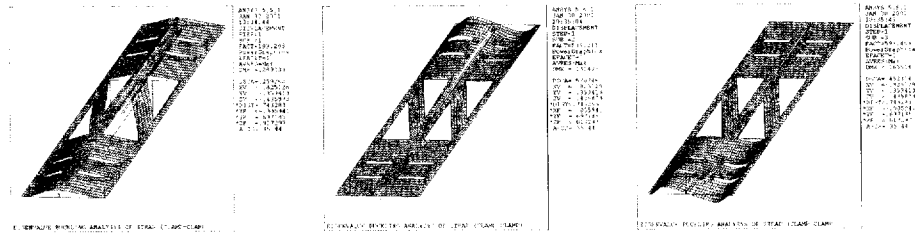
(b) 16X16형 지지격자판

A : $U_x=U_y=U_z=R_x=R_y=R_z=0$, B : $U_x=U_y=U_z=0$, C : $U_x=U_y=U_z=R_x=R_y=R_z=0$,
D : $U_y=U_z=R_x=R_y=R_z=0$, E : $U_y=U_z=0$, F : $U_y=U_z=R_x=R_y=R_z=0$
G : Displacement Coupling with U_x

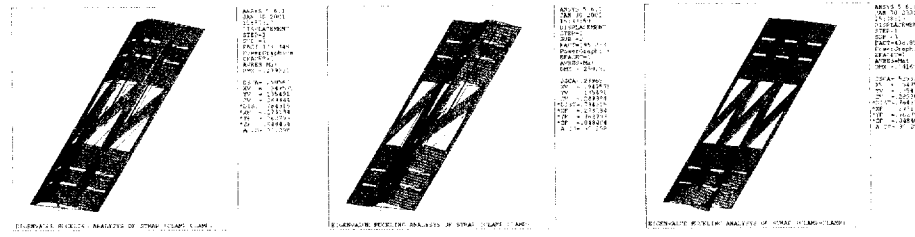
그림 6. 해석모델 및 경계조건



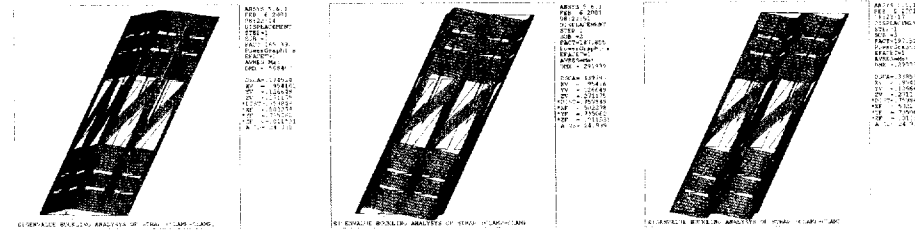
(a) 1-Cell Model



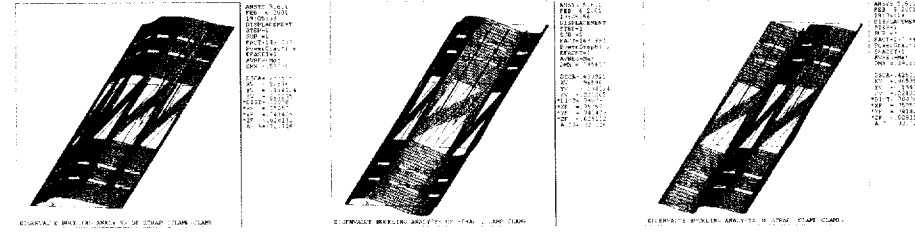
(b) 2-Cell Model



(c) 3-Cell Model

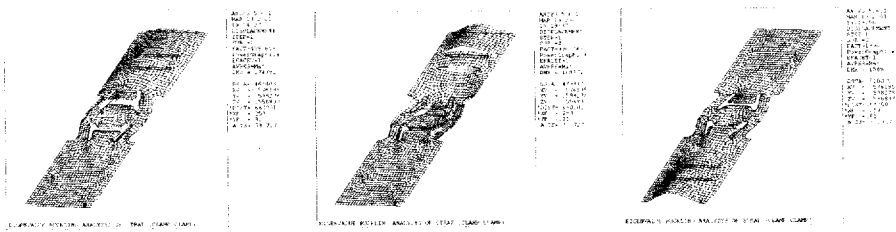


(d) 4-Cell Model

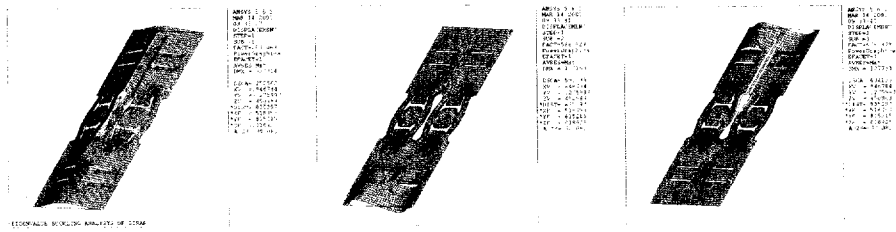


(e) 5-Cell Model

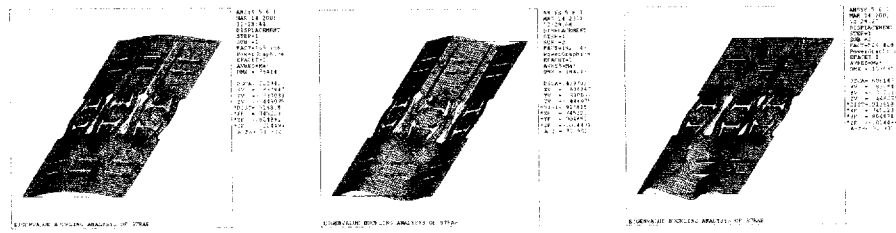
그림 7. 17X17형 지지격자판에 대한 좌굴모양



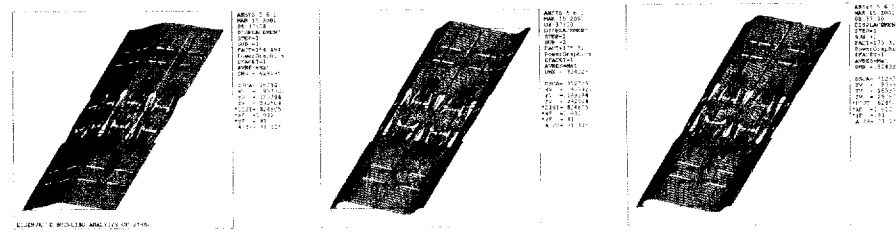
(a) 1-Cell Model



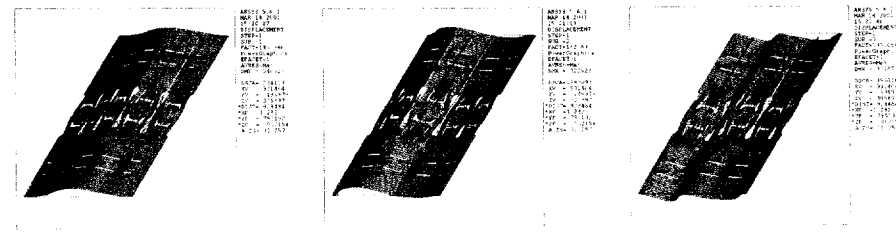
(b) 2-Cell Model



(c) 3-Cell Model



(d) 4-Cell Model



(e) 5-Cell Model

그림 8. 16X16형 지지격자판에 대한 좌굴모양