

격자 구조물의 비선형 동적 측면 충격해석

윤경호* · 송기남* · 김홍배**

Nonlinear Dynamic Lateral Buckling Behavior of a Grid Structures

Kyung-Ho Yoon, Kee-Nam Song and Hong-Bae Kim

Key Words: Grid Structures(격자구조물), Buckling Behavior(좌굴거동), Shock Test(충격 시험), Perfect Nonlinear Dynamic Analysis(완전 비선형 동적 해석), Deformed Shape(변형 형상)

Abstract

The spacer grid is one of the main structural components in fuel assembly, which supports the fuel rods, guides cooling water, and protects the fuel assembly from the external impact load such as earthquakes. The nonlinear dynamic impact analysis is conducted by using the finite element code ABAQUS/Explicit. Boundary condition for dynamic analysis is well applied to the test condition. Simulation results also similarly predict the local buckling phenomena. In addition to the buckling parameter, the local buckling cause is examined by both simulation and test method. It is found to correspond well with the test results. Impact tests are also carried out for some specimens of the spacer grid in order to compare the results between the test and the simulation. This test is accomplished by a free fall dummy weight onto the specimen. From this test, only the uppermost and lowermost layers of the multi-cell are buckled, which implies the local buckling at the weakest point of the grid structure.

수명기간 동안 핵연료집합체 내에서 핵연료봉들이 정해진 위치를 건전하게 유지되도록 하는 기계적 지지 기능과 사고시(지진 및 냉각재상실사고와 같은)에 원자로심을 긴급 정지시키기 위한 제어봉들의 삽입경로를 보장해주는 구조적 기능, 즉, 횡방향 하중에 대해 구조물의 건전성을 유지하는 기능도 갖고 있다. 따라서 이러한 지지격자 구조물은 핵연료봉과의 마찰에 의한 상호작용으

1. 서론

핵연료의 지지격자는 관형 스프링 및 덤플이 형성된 얇은 사각판들을 서로 엇갈리게 배열하고 이들 교차부들을 용접한 구조물이다. 이들 박스-기둥(box-column) 형태의 구조물들은 핵연료의

* 한국원자력연구소

** 한국항공우주연구원

로 인해 발생할 수 있는 핵연료봉의 기계적 손상 가능성을 줄일 수 있도록 설계가 이루어져야 할 뿐만 아니라 지진이나 예기치 못한 외부의 하중에도 핵연료봉 및 핵연료집합체 구조물을 보호할 수 있어야 하므로 충분한 구조적 강도를 갖도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 지지격자 구조물의 측면에서의 동적 충격에 의한 좌굴거동을 파악하기 위해 비선형 동적 유한요소 해석을 수행하였고, 이 결과를 검증하기 위해 자유낙하 충격시험을 수행하였다. 지지격자의 비선형 동적 해석을 수행할 때 가장 먼저 고려해야 할 사항은 지진과 같이 예기치 못한 사고가 발생할 경우 지지격자 구조물에게 가해질 수 있는 하중의 성격을 규정하고 모델을 설정하는 과정이다. 한편, 사고의 경우를 가상한 좌굴하중은 신중하게 결정되어야 하며, 일반적으로 안전성을 최대한 고려하여 결정하게 된다. 본 논문에서는, 지지격자 구조의 상세한 기하학적 형상과 해석에 적용된 경계조건 그리고 동적 충격해석 결과와 자유낙하 충격시험 결과와의 연관성에 대해 기술하였다. 또한 동적 충격하중에 의한 격자 구조의 좌굴발생 원인과 충격에 의한 격자체 구조의 충격 모드에 대하여 고찰하였다.

2. 지지격자 구조물의 동적 충격해석

2.1 기하학적 형상 및 재료의 물성

지지격자의 동적 충격해석 및 충격시험을 위해 3×3 셀을 갖는 격자체 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 셀의 외형 치수는 38.4×38.4×35 mm이고, 판재의 두께는 0.6 mm이다. 판재의 재질은 스테인레스강으로 재료의 탄성계수는 186.8 GPa이고, 포아송비는 0.3으로 하였다. 해석과정은 완전 비선형으로 하였으므로 재료의 항복응력 이후의 응력-변형률 값을 ASME의 스테인레스에 대한 물성을 사용하였다. 재료의 소성영역에서의 물성을 항복강도 258.6 MPa에 대한 값과 경화곡선으로부터 응력-변형률 관계를 근사하여 적용하였다. 해석에 사용된 스테인레스강의 응력-변형률 Table 1에 나타내었다.

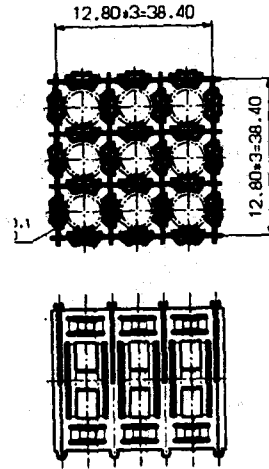


Fig. 1 The geometry of 3×3 cell of grid structures

Table 1 Plastic properties of stainless steel

응력 (MPa)	258.6	1582.9
변형률 (%)	0.0	0.6986

2.2 유한요소 모델 및 경계조건

3×3 셀 격자체의 동적 충격해석을 위한 유한요소 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 본 논문에서의 모든 유한요소 모델들은 4절점 쉘요소를 사용하였고, 요소의 수는 각각 2352개이고, 절점의 수는 3296개이다. 해석을 위한 경계조건은 시험에서 시편이 처한 경계조건을 가능한 모사할 수 있도록 격자체 하부의 네 모서리 에지를 z축 방향의 변위를 구속하였고, 격자체가 회전하지 않도록 두 개의 절점에 변위를 구속함으로써 충격시 회전을 일으키지 않도록 최소한의 구속만을 가하였다. 충격하중은 이 격자체의 상부에 격자체의 상면과 접촉하도록 한 강체 면(rigid surface)을 모델링하고 이 강체면은 자유낙하 충격시험시의 충격해머와 동일한 질량을 갖도록 질량요소를 정의하였다. 이 집중질량이 정의된 강체 면의 중앙에 초기 속도를 부여하여 격자체에 충격을 가하도록 하였다. 해석은 시험에서의 결과를 참고하여 시간의 증분을 2 msec로 하고 전체 해석시간을 40 msec로 하여 총 20개의 단계로 해석을 수행하였다. 이들 충격해석을 위한 경계조건을 Fig. 3에 나타내었다.

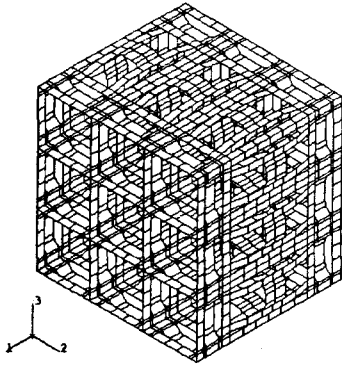


Fig. 2 FE model for non-linear dynamic analysis

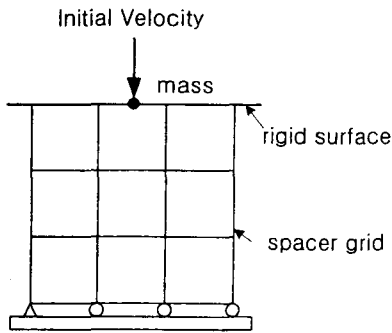


Fig. 3 Applied boundary condition for dynamic analysis of 3x3 cell grid

2.3 해석 결과

격자체 구조물의 비선형 동적 충격해석시 모델이 받게 되는 충격력은 모델의 하부에 변위를 구속한 네 개 에지에서의 반력을 합산하여 구하였다. 이들 반력, 즉 충격력은 강체 면에 가해지는 초기 속도의 증가에 따라 커지게 되나 격자체에 좌굴이 발생하게 되면 충격력은 오히려 감소하게 된다. Fig. 4에는 격자체의 강체 면에 부여된 초기 속도에 따른 충격력의 변화 추이를 잘 나타내고 있다. 이를 살펴보면 본 연구에서 설정한 3x3 셀을 갖는 격자체의 경우 초기 속도 0.4 m/sec 가 임계 충격속도임을 알 수 있다.

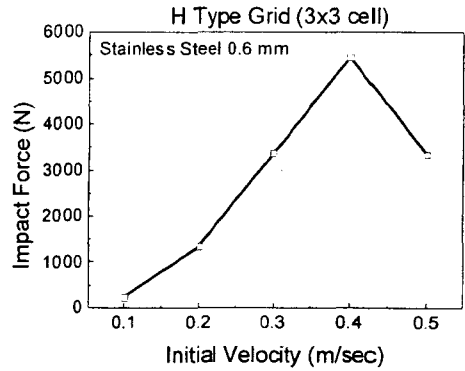


Fig. 4 Initial velocity vs. impact force

Fig. 5에는 격자체에 좌굴 현상이 발생된 초기 속도 0.4 m/sec에서 반력의 변화를 시간의 영역에서 나타내고 있다. 이것은 강체 면이 초기 격자체 시편에 충격을 가한 후 격자체로부터 반발되어 떨어져나가는 현상을 잘 묘사하여 격자체 시편이 받는 반력은 약 10 msec 이후에는 영이 됨을 알 수 있다.

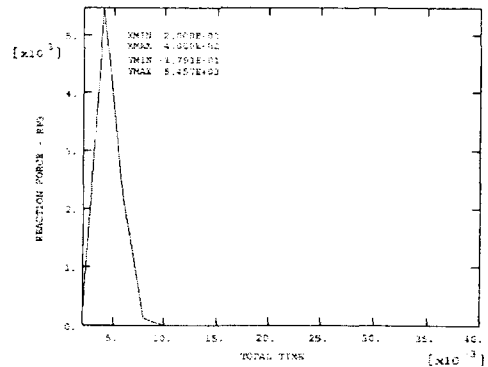


Fig. 5 Reaction force by dynamic analysis

Fig. 6에는 격자체가 받는 반력이 최대가 되는 약 4 msec에서의 von Mises 등가응력 분포를 나타내었다. 이를 살펴보면 격자체가 받는 외력에 대해 주로 저항하는 모서리 다리(corner leg)에서 응력이 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7에는 이 때의 등가 소성 변형률 분포를 나타내었는데, 등가응력과 마찬가지로 모서리 다리 부분에서 변형률이 최대를 나타내고 있다. 이것

은 격자체를 구성하기 위해 박판을 서로 엇갈리도록 하고 이들이 교차되는 부분을 용접하게 되는데 이들 용접부 주변에는 응력 집중(stress concentration)이 발생하게 되고 좌굴이 진행됨에 따라 용접부 주변의 소성 힌지(plastic hinge)에서 변형을 집중현상(strain localization)이 심화함을 알 수 있다. 구조물에서 소성변형이 발생하게 되면 이 영역에서는 국부적으로 재료의 강성이 저하하게 된다. 그러면 대부분의 변형이 이 영역에 집중되게 되고 이에 의해 탄성 영역에서는 재하(unloading)현상이 발생하여 좌굴 후에 구조물의 강도가 급격히 감소하게 된다.

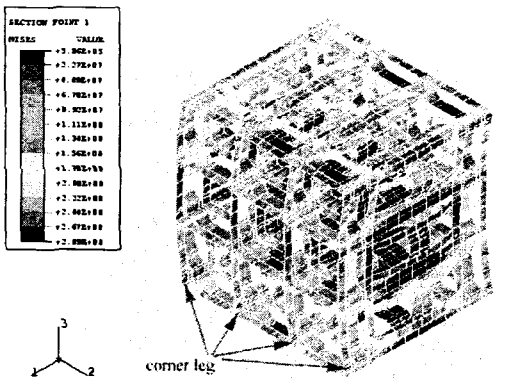


Fig. 6 von Mises equivalent stress contour

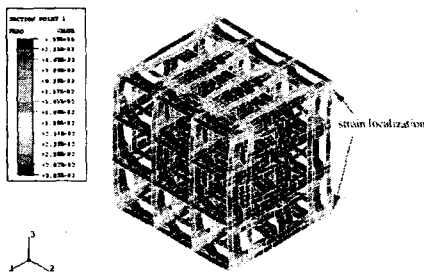
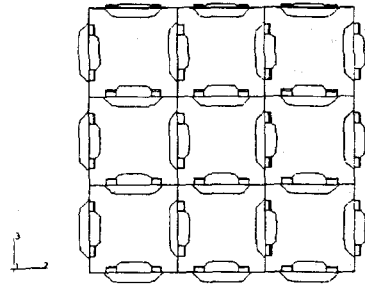
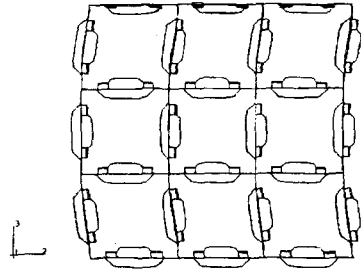


Fig. 7 Equivalent plastic strain contour

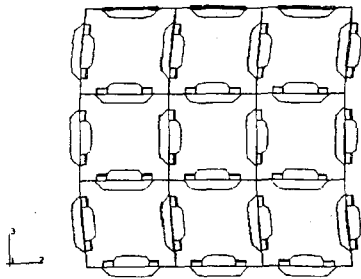
Fig. 8에는 격자체의 비선형 동적 충격해석에서 얻은 변형된 형상을 시간의 변화에 따라 도시하고 있다. 이 그림으로부터 격자체의 충격모드는 격자체에서 반력이 최대가 되는 직후인 약 6 msec에서 최대의 변형을 보이다가 원래의 형상으로 복원되는 현상을 잘 보여주고 있다.



(a) 2 msec



(b) 6 msec



(c) 10 msec

Fig. 8 Deformed shape by dynamic analysis

3. 자유낙하 충격시험

3.1 시험 방법

본 장에서는 격자체의 자유낙하 충격시험에 대하여 기술하고자 한다. 이 시험을 위한 장치의 개략을 Fig. 9에 나타내었다. 시험장치는 시편에 충격을 가하는 상부 구조물과 시편이 고정되고 전체적인 강성을 유지하는 하부로 구성되어 있

다. 시편에 충격을 가하는 충격해머는 약 20.43 kg으로 격자체 시편에 비해 중량이 클 것으로 판단되어 이 충격해머의 상단에 스프링으로 된 댐퍼를 설치하였다. 이 충격해머가 시편에 충격하중을 가하는 부분에 힘 변환기(force transducer)를, 해머의 상부에 충격을 가하는 시점의 충격 가속도를 측정하기 위한 가속도계(accelerometer)를 부착하였다.

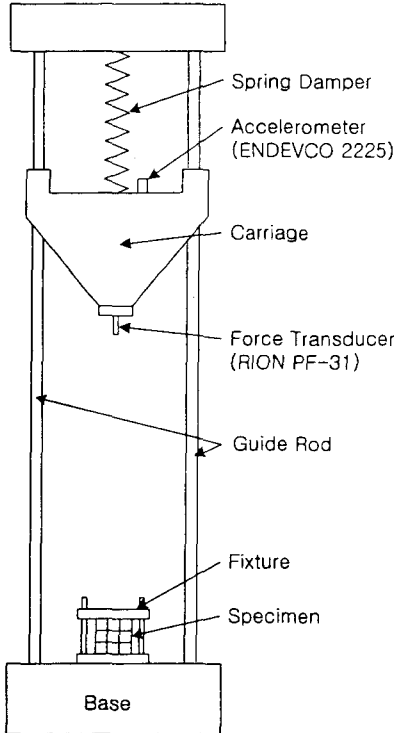


Fig. 9 Schematic diagram for free fall shock test

3.2 시험 결과

3×3 셀 격자체 4개에 대하여 자유낙하 충격시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 충격력은 시편에 따라 약 10 %의 분포를 나타내었으며, 충격력은 4778 N에서 6401 N의 범위를, 충격 가속도는 17.6 g에서 25.8 g의 범위를 나타내었다. 이들 4개의 시편을 사용하여 시험한 결과의 평균값은 각각 충격력 5365 N, 충격 가속도 21.5

g를 얻었다. 충격시험시의 충격 유지시간(duration)은 7 msec에서 10 msec로 좌굴을 일으키기 전과 좌굴이 발생한 이후의 유지시간에 약간의 변화를 보이고 있다. 또한 좌굴을 일으킨 낙하높이를 평균한 값은 0.0889 m이었다. 충격시험후의 각 시편의 변형된 형상을 촬영하여 Fig. 10과 같은 충격모드를 얻었다. 이것은 비선형 동적 충격해석에서 얻은 변형 형상과 아주 유사함을 알 수 있다. 즉, 격자체는 측면에서의 충격하중에 의해 최상부와 최하단의 셀에서 먼저 전단 형태의 국부적인 좌굴이 발생하고, 그 이후에는 이러한 변형 형상이 계속되고 중간의 셀들은 최초의 형상을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

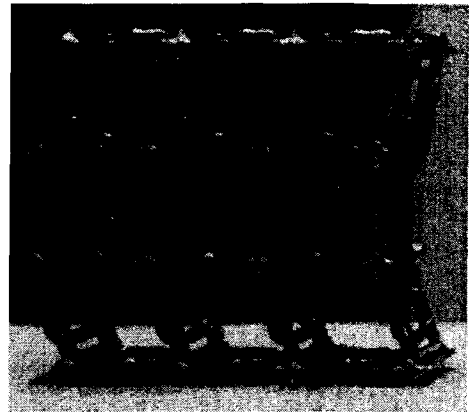


Fig. 10 Deformed mode shape by shock test

3.3 임계 충격속도

충격시험시의 충격속도는 가속도계로부터 구한 신호를 앰프에서 직접 적분하여 속도로 변환하여야 하나 본 시험에서 적분 알고리즘을 갖고 있지 않은 앰프를 사용하여 시험을 수행하였으므로 충격시험기가 갖는 기하학적 데이터 및 여러 구성 부품들의 상수를 고려하여 임계 충격속도를 계산할 수 있는 수식을 유도하였다. 이것은 간단한 에너지 평형의 원리와 계의 힘의 평형 원리를 적용하여 다음과 같은 최종 형태의 임계 충격속도를 계산할 수 있는 수식을 얻었다. 이를 Fig. 11에 도식적으로 나타내었다. 즉, 에너지 평형 원리로부터,

$$\begin{aligned}
 & -mg(x_0-l) + \frac{1}{2}k(x_0-l)^2 \\
 & = \frac{1}{2}mv^2 - mg(x_0+h) + \frac{1}{2}k(x_0+h)^2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

계의 힘의 평형 원리로부터

$$mg = kx_0 \tag{2}$$

여기서 m 은 충격해머의 이동질량(moving mass)이며, k 는 스프링 상수이다.

따라서 식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 형태의 충격속도를 구할 수 있는 식을 얻는다.

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(l^2 - h^2)} \text{ or } \omega_n \sqrt{(l^2 - h^2)} \tag{3}$$

이들 기하학적 데이터 및 구성부품들의 상수를 대입하여 얻은 계의 ω_n 은 1.27이다. 이 식에 시험으로부터 얻은 좌굴시의 평균 자유낙하 높이 0.0889 m를 대입하여 약 0.38 m/sec의 임계 충격속도를 얻었다.

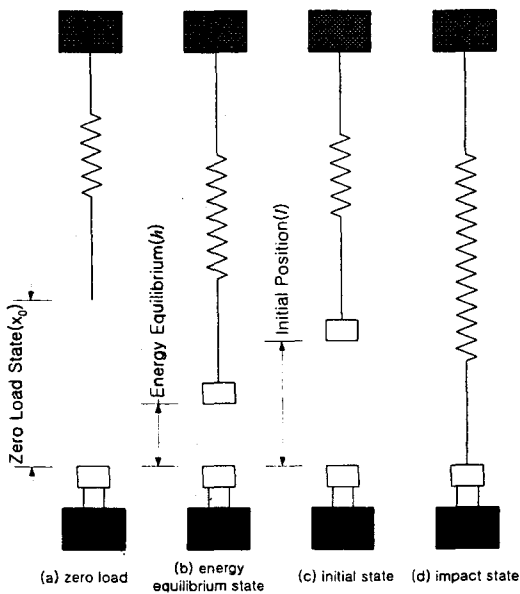


Fig. 11 Free body diagram of free fall shock test

4. 결과 및 고찰

4.1 격자체의 좌굴거동

3×3 셀을 갖는 격자체의 비선형 동적 충격해석 결과와 자유낙하형 충격시험을 수행하여 얻은 결과들을 Table 2에 요약하였다. 해석 결과는 자유낙하형 충격시험의 결과들과 아주 잘 일치하고 있어 본 해석방법과 모델은 신뢰할만하다고 판단된다. 임계 좌굴강도의 경우 그 차이는 약 1.7 %이었고, 임계 충격속도는 약 5.3 % 정도를 나타내었다. 또한 충격에 의한 격자체의 변형 형상도 Fig. 8과 Fig. 10에 나타난 바와 같이 서로 유사한 것으로 나타났다. 격자체의 좌굴은 최상단과 최하단 셀의 용접부에서 응력집중이 발생하게 되고 좌굴이 진행됨에 따라 용접부 주변의 소성현지에서 변형률 집중현상이 나타났다. 이러한 중첩된 판으로 구성된 격자체의 좌굴은 상대적으로 가장 취약한 부분에서 전단형태의 국부적 좌굴이 발생되고 좌굴이 발생한 이후에는 이 부위에서만 소성변형이 진행되는 것으로 나타났다. 격자체의 동적 충격해석 결과인 등가 소성변형 분포를 살펴보면 쉽게 알 수 있는데 외력에 주로 저항하고 있는 격자 모서리의 다리 부분에서 변형률이 국부적으로 집중되는 현상이 두드러진다. 한편 격자체의 충격시험에서는 시험의 크기가 변형률 게이지를 부착하기에는 너무 협소하여 힘 변환기를 부착하여 시험을 수행함으로써 이러한 국부 영역에서의 변형률 집중 현상을 시험에서도 관찰할 수는 없었다.

Table 2 Comparison between test and analysis results

Classification	P_{cr}^*	V_{cr}^*
Non-linear dynamic analysis	5457 N	0.4 m/sec
Free fall shock test(average)	5365 N	0.38 m/sec
Deviation (test-analysis)/test	- 1.71 %	- 5.26 %

* P_{cr} : Critical impact strength

* V_{cr} : Critical impact velocity

4.2 충격모드

격자체의 비선형 충격해석 및 자유낙하형 충격시험에서 모두 유사한 충격모드를 얻었다. 본 해석 및 시험에 적용한 3×3 셀을 갖는 격자체에서 충격에 의한 변형모드는 최상단과 최하단의 셀에서만 전단 형태의 국부 좌굴 형상을 가졌으며,中间的 셀들은 원래의 형상을 유지하는 것으로 나타났다. 또한 탄성영역에서는 좌굴시 일어났던 변형 형상이 좌굴 후 탄성 제하에 의해 다시 초기의 형상으로 되돌아가는 현상을 관찰할 수 있었다.

5. 결 론

지지격자 구조물의 비선형 동적 충격해석을 유한요소법을 사용하여 해석하였고, 자유낙하 충격시험을 통하여 해석결과를 검증하였다. 그 결과 유한요소 해석 방법은 시험결과와 비교적 잘 일치하였고, 따라서 본 해석모델 및 절차는 신뢰할 만하다고 판단된다. 얇은 판을 서로 중첩시키고 이들의 교차부를 용접하여 형성하는 지지격자 구조물은 국부적 좌굴 경향을 보이며 이것은 해석 및 시험에서 모두 관찰되었다. 이러한 국부적 좌굴 현상은 용접부에서 응력 집중이 발생되고 좌굴이 진행됨에 따라 용접부 주변의 소성 현지에서 변형률 집중화에 기인한 것으로 보인다. 이것은 해석에서는 명확히 관찰할 수 있었으나 시편의 기하학적 제한으로 인해 힘 변환기와 가속도계를 부착하는 시험 방법의 선택으로 시험에서는 관찰하지 못하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Choi Kang-Hyouk et al., 1999, "FE Analysis of Nonlinear Buckling Behavior of a Spacer Grid in Fuel Assembly," SMiRT-15, Vol. 2, pp. 381~387.
- (2) Hibbitt, H. D., Karlsson, G. I. and Sorensen, E. P., 1998, *ABAQUS/Explicit User's Manual (version 5.8)*, Vol. I and II, Hibbitt,

Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, R.I., USA.

- (3) Friedrich, B., 1952, *Buckling Strength of Metal Structures*, McGraw-Hill Book Company, NY.
- (4) Zdenek, P. B. et al., 1991, *Stability of Structures : Elastic, Inelastic, Fracture, and Damage Theories*, Oxford University Press, UK.
- (5) 1998, *FEMtools ; Integrating Test and Analysis Data User's Manual (version 1.4.3)*, Dynamic Design Solutions, Leuven, Belgium.
- (6) ASME, Section III, Division I, Appendix I, 1986.