

충격력을 받는 구형 셸의 혼돈거동 해석

Chaotic Response of a Spherical Shell to Impulsive Loading

이 재 영* 강 영 철**
Lee, Jae-Yeong Kang, Young-Chul

요 지

계가 혼돈거동을 나타낼 경우에는 변수들의 미소변화에 의해서도 계가 전혀 다른 거동을 나타낼 수 있기 때문에 비선형계의 설계 및 해석시에는 이를 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 구형 셸의 중앙에 충격하중이 수직방향으로 작용하는 경우, 셸의 기하학적 비선형성과 재료적 비선형성으로부터 기인되는 혼돈거동을 해석하였다. 셸의 탄소성거동을 유한요소법을 이용하여 구한 후 계의 거동을 범위-시간이력, 프랑카레 맵, phase diagram 등의 표준적인 방법들을 이용하여 셸의 혼돈거동을 규명하였다. 해석결과, 계는 혼돈거동을 나타내었으나 탄소성보의 경우와는 달리 초기조건의 미소변화에 대한 극도의 민감도는 나타나지 않았으며 시간에 대한 셸의 거동특성도 크게 변하지 않았다. 프랑카레 맵은 한정된 영역에 걸쳐서 점들이 분포되었기 때문에 계의 거동이 혼돈거동임을 보여 주고 있지만 혼돈계의 프랑카레 맵에서 나타나는 기하학적 구조는 나타나지 않았다. 에너지선도를 이용하여 셸이 하중의 작용방향 또는 반대방향으로 불규칙적으로 snap-through되는 원인을 규명하였다.

Abstract

Engineers must be aware of possible sources of chaotic behavior. They may render conventional design predictions untrustworthy and potentially unsafe because of the sensitivity to initial conditions. Dynamic responses of a spherical shell subjected to impulsive loading which act on the center are analyzed using the finite element method. The chaotic responses are identified by the standard methods, such as displacement-time histories, Poincare maps, and phase diagrams. The responses are chaotic, but, not so sensitive to the initial conditions, and the characteristics of responses are not changed with time, in contrast to the case of the responses of beam. The Poincare points scattered in the limited area represent that the responses are chaotic, but do not show the geometric structures. The snap-through phenomena of the shell to the side of the direction of the load or of the opposite direction, is analysed by using the energy diagram.

Keywords : chaotic response, spherical shell, impulsive loading, finite element method, snap-through, Poincare map, sensitivity to initial condition

* 육군사관학교 무기공학과, 부교수
** 정회원·육군사관학교 토복공학과, 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 1997년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

고정 또는 힌지의 경계조건을 갖는 두께가 얇은 보, 아치, 셸 등의 구조물에 충격력이 작용하는 경우, 작용한 충격력으로 말미암아 길이 또는 반경 방향으로 소성변형이 발생하게 되고 이 소성변형으로 말미암아 구조물은 본래의 기하학적인 구조와는 다른 구조를 갖게 될 수 있다. 예를 들어, 보의 경우 본래의 평형 위치에 대한 진동에서 새로운 평형 위치에 대한 얇은 아치의 진동으로 거동형태가 변환될 수 있다. 구조물의 거동은 거동간 발생하는 소성변형량에 의해서 결정되나, 거동을 하는 동안 소성변형은 계속적으로 발생할 수 있기 때문에 구조물의 기하학적인 형태도 시간에 대하여 계속 변하게 된다. 따라서 구조물의 탄소성거동을 정확히 해석하기 위해서는 구조물의 거동간 발생하는 소성변형량을 정확히 측정해야 한다. 그러나 소성변형은 순간 순간의 변형상태에 의존하기 때문에 거동간 소성변형의 정확한 예측은 불가능하다. 특히 소성변형량은 구조물의 거동을 지배하는 매개변수 값들의 일부 영역에서는 매개변수들의 변화에 대해 극도로 민감할 뿐만 아니라 아주 복잡하고 예측 불가능한 혼돈거동(chaotic vibration)이 나타나게 하는 원인이 된다¹⁾.

계의 장기적 거동을 지배하는 소성변형량은 실험에 의한 측정 또는 수치적 계산을 통하지 않고서는 작용하중에 대한 소성변형량을 정확히 구하기란 불가능하다. Kolsky et al.²⁾ 및 Li & Yan³⁾에 의해 연구된 바와 같이 실험시 구조물 또는 실험장치가 필연적으로 갖게 되는 초기 불완전성(initial imperfection) 때문에 동일한 초기조건에 의한 실험을 반복하여도 전혀 다른 거동이 나타날 수 있으며, 아주 작은 초기조건의 변화에 의해서도 전혀 다른 거동 특성을 나타낼 수 있기 때문에 실험을 통하여서도 구조물의 정확한 거동을 구할 수 없게 된다. 또한 Symonds & Lee⁴⁾와 Lee et al.¹⁾ 등에 의하면 혼돈영역 내에서는 구조물의 거동이 매개변수의 미소변화에 대하여 극도로 민감하므로 유한요소법등의 수치적인 방

법을 통하여서도 구조물의 거동형태 및 장기적인 거동의 예측이 불가능하게 된다. 그러나 이러한 예측 불가능하고 복잡한 거동도 보에 대한 2자유도계 문제에서는 소성변형량에 의하여 결정되는 정적인 평형점에서의 탄성 변형에너지의 크기와 총 가용에너지의 크기를 비교함으로써 전체적인 거동형태를 예측할 수 있음이 Lee & Symonds⁵⁾, Qian⁶⁾ 등에 의해 연구되었다.

앞에서 언급했듯이 비선형계에서 혼돈거동이 발생하면 혼돈거동의 최대 특징인 초기조건에 대한 극도의 민감도로 인하여 매개변수들이 조금만 변해도 계가 전혀 다른 거동을 나타낼 수 있다. 특히 충격력을 받는 구조물의 경우에는 기하학적 비선형성이 수반되기 때문에 이러한 구조물의 해석 및 설계 시에는 혼돈거동의 가능성을 고려하여야 한다. 보의 경우에는 충격력에 대한 혼돈거동의 연구가 많이 이루어져 왔으나 아직 셸, 평판 등의 구조물에는 연구가 확장되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 셸의 혼돈거동을 규명하고, 에너지 접근방법을 이용하여 셸의 snap-through 현상을 설명하고자 한다. 이를 위해 구형 셸(spherical shell)의 중앙에 충격하중이 수직방향으로 작용하는 경우에 대한 셸의 탄소성 거동을 유한요소법을 이용하여 구한 후 거동의 변위-시간이력(displacement-time history), 위상도(phase diagram), 프앙카레 맵(Poincare map) 등과 같은 혼돈거동을 규명하는 표준적인 방법을 이용하여 혼돈거동을 해석하고자 한다. 한편, 본 연구에서 감쇠는 고려하지 않았다.

2. 유한요소 해석

그림 1(a)에 보여진 바와 같이 주위가 고정된 경계조건을 갖는 구형 셸의 중앙에 충격하중이 작용하는 경우의 탄소성거동을 구하기 위해 본 연구에서는 ABAQUS/Standard⁷⁾ 유한요소 프로그램을 사용하였다. 해석에 사용된 셸은 직경 20cm, 두께 1mm의 알루미늄 합금으로 셸은 탄성-완전소성의 재료적 성질을 갖는 것으로 가정하였으며 재료의 물성은 탄성계수 $E=70$ GPa, 항

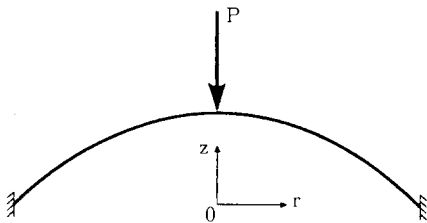
복 응력 $\sigma_0=0.3$ GPa, 밀도 $\rho=2700\text{kg/m}^3$, 포아송비 $\nu=0.3$ 이다.

셸은 축 대칭이므로 반경방향으로 반쪽만 해석에 사용되었으며 10개의 요소로 분할되었다. 사용된 요소는 ABAQUS element library 중에서 세 개의 절점을 갖는 2차 요소인 SAX2가 사용되었다. 이 요소는 그림 1(b)에서와 같이 3개의 절점을 갖고 각 절점당 3개의 자유도(u_r, u_z, ϕ)를 갖는데, 여기서 ϕ 는 r - z 평면에서의 회전이다. 이 요소는 전단변형을 허용하며 변형간 셸의 두께가 증가하여 셸 특성길이의 1/15을 초과하는 경우에는 thick shell 이론이 적용되고, 두께가 감소하는 경우에는 Kirchhoff thin shell 이론이 적용되지만 본 연구에서는 thin shell 이론만 적용된다. 하중은 셸의 중앙에 수직방향으로 짧은 충격력으로 작용하는 것으로 하였으며 여기서 하중의 작용 시간은 0.5 ms 이다.

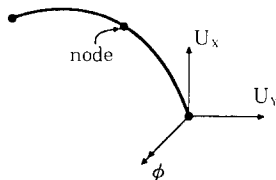
ABAQUS/Standard⁷⁾ 코드에서는 동적 문제를 해석하기 위해 Hilber-Hughes-Taylor operator를 이용한 implicit scheme을 사용하고 있는데 이 방법에서는 가상 감쇠(artificial damping)를 지정해 줄 수 있는 변수 α 가 사용되고 있으나 본

연구에서 α 는 0으로 하였으며 이 경우의 적분 방법은 Newmark- β 방법이 된다. Implicit scheme에서는 automatic time incrementation과 fixed time incrementation 중 한 방법을 택할 수 있다. 매 계산과정에서 수렴도를 점검한 후 적분 시간 증분이 자동으로 조절되는 automatic time incrementation 방법을 본 모델의 계산에 사용한 결과, 적분 시간 증분이 사용자에 의해 주어지며 계산 과정 중 그 값이 변하지 않는 fixed time incrementation 방법에 비하여 상대적으로 많은 시간이 계산에 소요될 뿐 아니라 해가 수렴하는데에도 어려움이 따랐기 때문에 본 연구에서는 fixed time incrementation 방법을 사용하였다.

셸에 기하학적 비선형성을 부여하기 위하여 NLGEOM 옵션을 적용하였는데 이는 수치적분 과정에서 응력 해석시 기하학적 비선형성을 고려한다. 비선형 방정식을 효과적으로 풀기 위하여 표준 Newton method 대신 quasi-Newton method를 사용하기 위한 Solution Technique 옵션을 적용하였다. 한편 재료에 감쇠를 주기 위하여 Rayleigh damping 옵션을 이용할 수도 있으나 이 옵션을 이용하기 위해서는 mass proportional damping ratio α 와 stiffness proportional damping ratio β 를 정의하여 주어야 하는데, 동일한 감쇠에 대하여 서로 다른 많은 α 와 β 값이 존재하며 이 두 계수의 변화에 대하여 수치해가 극도로 민감하기 때문에 본 연구에서는 감쇠가 없는 거동의 해석에만 국한하기로 하였다.



(a)구형 셸 모델



(b)축대칭 셸 요소 SAX2

그림 1 셸 모델과 요소 SAX2

3. 계산결과 및 해석

적분시간 증분이 각각 $dt=1.0 \times 10^{-5}$ 초와 2.0×10^{-5} 초이고 셸의 중앙에 작용하는 충격력의 크기가 $P=100$ N인 경우 셸 중앙에서의 수직 변위에 대한 시간이력이 그림 2에 예시되어 있다. 여기에서 실선과 점선은 각각 적분시간 증분이 1.0×10^{-5} 초와 2.0×10^{-5} 초에 대한 수직 변위들을 나타내는데 그림에서는 실선과 점선이 정확히 겹치기 때문에 점선은 보이지 않는다. $P=100$ N인 경우에는 소성변형이 발생하지 않으므로 계는 탄

성거동을 나타내며 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 적분시간 증분이 변화여도 수직변위는 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 한편 본 연구에서 사용한 시간증분은 해가 잘 수렴하며 계산 시간이 과다 소요되지 않는 중간 값을 택했다. 그림 3은 충격하중의 크기가 1000 N인 경우에 대한 수직변위와 소성 변형에너지에 대한 시간변화를 보여주고 있다. 여기에서 실선과 점선은 각각 적분시간 증분이 2.0×10^{-6} 초와 4.0×10^{-6} 초에 대한 경우이며, 이 때에는 그림 3에 나타난 바와 같이 소성변형이 발생함으로 말미암아 쉘의 거동은 탄소성거동을 나타낸다. 적분시간 증분이 변해도 거동이 변하지 않았던 탄성거동의 경우와는 달리 적분시간 증분이 변함에 따라 두 거동은 시간에 대하여 점점 발산(diverge)하고 있다. 그 이유는 적분시간 증분이 변함에 따라 계산된 소성변형량의 크기가 달라질 뿐만 아니

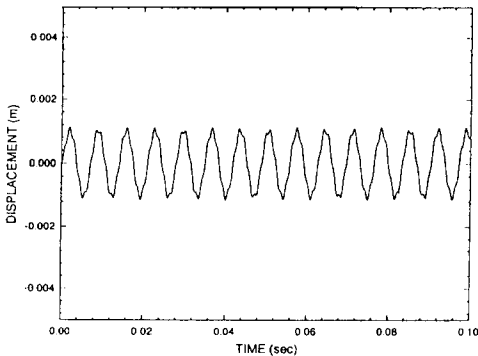


그림 2 쉘 중앙 수직변위의 시간이력

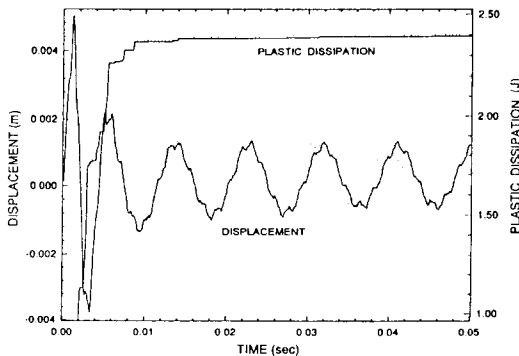
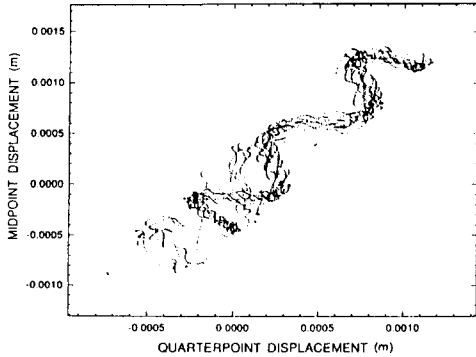
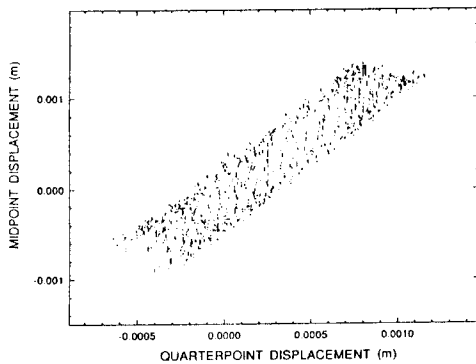


그림 3 수직변위와 소성변형 (고정지지)

라 소성변형에 의해 계의 기하학적 형상도 변하게 되므로 결국 거동의 형태가 발생하는 소성변형량에 의해 지배되기 때문이다. 계의 혼돈거동을 규명하는 여러 방법중에서 가장 유용하게 사용되는 방법 중 하나가 프앙카레 맵(Poincare map)이다. Non-autonomous 계에 대한 프앙카레 맵은 계의 거동이 강제주파수에 해당되는 상공간 내에 위치한 한 수직단면을 통과할 때 이 단면상에 나타나는 점들에 의하여 형성되는 반면, autonomous 계의 경우에는 강제주파수가 존재하지 않기 때문에 기존의 방법을 사용할 수는 없다. 따라서 본 연구에서의 프앙카레 맵은 Dowell⁹⁾에 의하여 제안된 autonomous 계에 대한 방법을 이용하였다. 즉, 쉘의 반경 방향으로 1/4 되는 지점에서의 속도가 0이 될 때, 이 지점과 쉘 중앙에서의 수직변위에 해당되는 점들을 두 변위가 이루는 상공간 내에 위치한 한 단면에 표정함으로써 구하였다. 계의 거동이 주기적인 경우의 프앙카레 맵은 유한한 숫자의 점들로 구성되어 있으며, 거동이 준주기적인 경우의 프앙카레 맵은 유한한 선들로 구성되어 있다. 반면에 혼돈계에서의 프앙카레 맵은 일정한 영역에 걸쳐 분포된 점들로 구성되어 있으며 이러한 점들은 기하학적 모양, 즉, 프랙탈(fractal) 구조를 나타내고 있다. 그림 3의 실선과 점선에 해당되는 프앙카레 맵들이 그림 4(a), (b)에 보여져 있다. 이 프앙카레 맵들은 프앙카레 점들이 제한된 영역 내에서 분포되어 있으며 이는 구조물의 거동이 혼돈거동임을 보여준다. 그러나 이 경우의 프앙카레 맵은 프랙탈 구조를 나타내는 탄소성보 거동¹⁾에서의 경우와는 달리 어떠한 프랙탈 구조를 나타내고 있다고 보기는 어렵다. 그러나 적분시간 증분이 변함에 따라 프앙카레 맵이 전혀 다른 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 양단이 고정된 보의 탄소성 거동에 대한 유한요소 해석 결과⁴⁾에서는 충격하중의 크기 및 ABAQUS 적분 scheme에 사용되는 변수들의 미소 변화에 대하여 전혀 다른 거동형태, 즉 매개 변수 변화에 대한 극도의 민감도를 나타냈지만, 그림 2, 3에 나타난 바와 같이 쉘의 거동에서는 초기 조건의 변화에 대한 극도의 민감도를 보이지 않고 있다. 그러나 그림 3에서와 같이 거동이 복잡한 모



(a) $dt=2.0 \times 10^{-6}$



(b) $dt=4.0 \times 10^{-6}$

그림 4 Poincaré maps($P=1000N$)

양을 보이고 있는데 그 이유는 계가 반경방향으로 구속된 경계조건을 갖고 있기 때문에 충격하중이 작용함에 따라 반경 방향으로의 영구적인 인장변형이 발생하기 때문이다. 이를 보이기 위하여 그림 3의 경우와 모든 조건이 동일하지만, 반경방향으로의 변위 및 회전이 자유로운 로울러 지지의 경계조건을 갖는 셸의 거동이 그림 5에 나타나 있다.

여기에서 실선과 점선은 각각 $dt=2.0 \times 10^{-6}$ 초와 4.0×10^{-6} 초에 대한 수직변위와 소성에너지를 나타내며 두 선은 서로 일치한다. 주위가 고정된 경계조건을 갖는 경우인 그림 3과 비교하여 볼 때, 반경방향으로의 거동이 구속되지 않은 경우의 거동은 그림 3의 반경방향으로의 거동이 구속된 경계조건을 갖는 셸에 비하여 상당히 정상적인 거동을 나

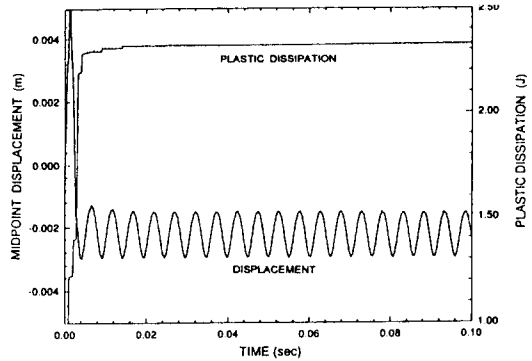


그림 5 수직변위와 소성변형 (로울러지지)

타내고 있으며 적분시간 증분의 크기가 변하여도 두 거동은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 그림 3과 그림 5를 비교해보면 셸의 거동이 복잡하고 시간의 변화에 대하여 두 거동이 발산하는 이유는 횡방향으로의 운동이 구속된 경계조건 때문임을 알 수 있을 것이다. 그러나 그림 5의 경우에는 그림 3과는 달리 셸의 거동이 첫번째 진동 후 하중이 작용한 방향의 반대방향에서 snap-through되어 일어나고 있다. 이와 같이 하중이 작용한 방향의 반대 방향에서 구조물의 거동이 존재하는 경우를 비정상 거동(anomalous behavior)이라 부르며 Symonds and Wu⁹⁾와 Lee et al.¹⁾ 등에 의하여 해석적으로, Kolsky et al.²⁾과 Li and Yan³⁾ 등에 의해 실험적으로 연구된 바 있다. 그림 5에 나타난 바와 같이 충격하중이 작용 직후 셸은 하중의 작용방향(+)으로 최대 변형점에 도달하게 되고, 이어지는 복원운동(recovery motion) 이후 셸의 거동은 음(-)의 방향에 국한되어 발생하고 있다. 한편 소성변형은 거동초기에는 시간에 대해 지속적으로 발생하나 일정 시간 경과 후에는 소성변형량은 변치 않는다. 거동이 작용하중의 반대방향(-) 또는 작용하중 방향(+) 쪽에 snap-through 되는지는 Lee & Symonds⁵⁾에 의해 설명된 바와 같이 계의 탄성 변형에너지 곡면의 기하학적 형태 뿐만 아니라 구조물의 안정 평형점(stable equilibrium points)과 불안정 평형점(unstable equilibrium points)에서의 탄성 변형에너지와 총 가용에너지(탄성 변형에너지와 운

동에너지의 합) 간의 상대적인 차이에 의하여 결정되게 된다. 그러나 변형에너지는 구조물의 거동 간 지속적으로 발생하는 소성변형량의 함수이므로, 계산 또는 실험을 통하여 정확한 소성변형량을 구하지 않고는 주어진 초기조건에 대한 구조물의 거동형태를 예측하기가 불가능하게 된다.

그림 5의 경우에 해당되는 에너지곡선들이 그림 6에 나타나 있으며 여기서 실선과 점선은 각각 탄성 변형에너지 곡선과 총 가용에너지 곡선을 나타낸다. 그림 5의 소성에너지 곡선에 나타난 바와 같이 최대 변형점에 도달한 후 복원운동의 증기에 집중적으로 발생하는 소성변형으로 말미암아 그림 6의 점선에 나타난 바와 같이 최대 변형점에 도달 후 복원운동시 계의 총 가용에너지가 급격히 감소하게 된다. 다시 점선이 왼편에서 오른편으로 이동시, 즉 거동이 음의 방향에서 양의 방향으로 움직일 때, 계의 총 가용에너지(점선)가 불안정한 평형점에서의 탄성 변형에너지(실선)보다 작게 됨으로 말미암아 총 가용에너지 곡선이 왼편에서 오른편으로 넘어가지 못하게 되고 $-0.001 \sim -0.003m$ 사이에 갇히게 된다. 따라서 거동은 그림 5에서와 같이 음(-)의 방향에 국한되어 발생하게 되게 된다.

그림 3의 실선(고정지지; $P=1000 N$, $dt=2.0 \times 10^{-6}$ 초)과 그림 5의 실선(로울러지지; $P=1000N$, $dt=2.0 \times 10^{-6}$ 초)에 해당되는 위상도와 power density spectrum이 각각 그림 7과 그림

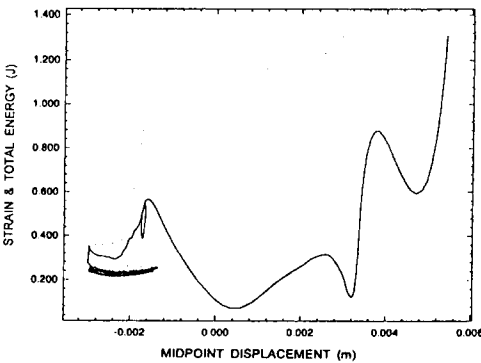
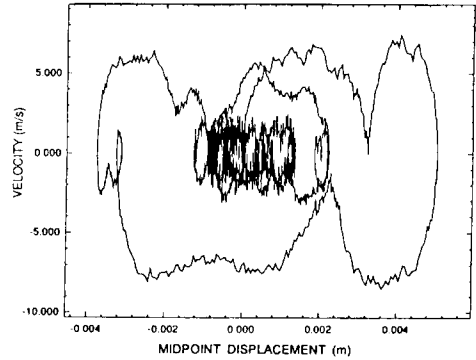
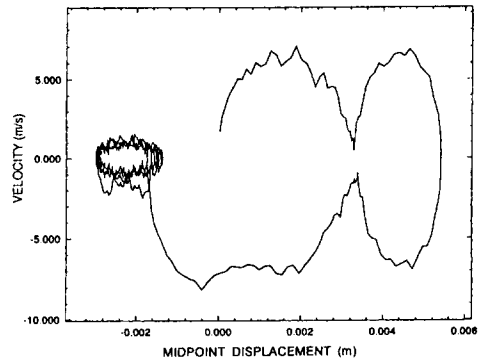


그림 6 총 가용에너지와 변형에너지 선도

8에 나타나 있다. 그림 7(a)의 고정지지인 경우, 복잡한 형태의 위상도는 계의 거동이 혼돈거동임을 나타내는 반면, 그림 7(b)의 로울러 지지인 경우의 상대적으로 단순한 위상도는 계의 거동이 준주기적 거동에 가까운 거동, 즉 약한 혼돈(weakly chaotic)거동임을 나타낸다. 그림 8의 power density spectrum에서 실선과 점선은 각각 고정지지와 로울러지지에 대한 경우로서, 주파수밴드가 넓은 실선의 스펙트럼은 거동이 혼돈적임을 의미한다. snap-through 현상을 설명하기 위한 다른 예가 그림 9, 10에 주어져 있다. 그림 9와 10은 각각 $P=4500N$ 인 경우에 대한 수직변위의 시간이력과 에너지선도이다. 그림 4($P=1000N$)에서는 거동이 최대 변형점에 도달한 후



(a)고정지지($P=1000N$)



(b)로울러지지($P=1000N$)

그림 7 고정지지와 로울러지지에 대한 위상도

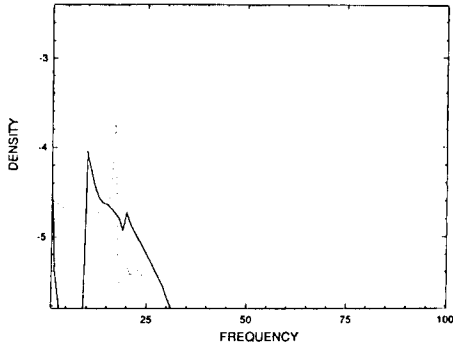


그림 8 Power density spectra

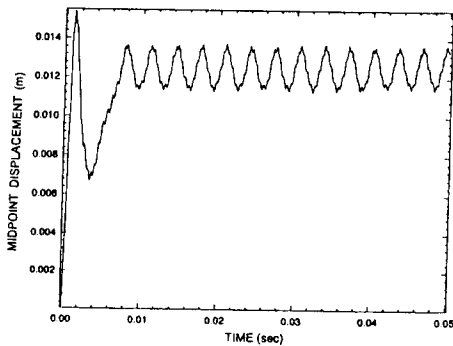


그림 9 셸 1/2지점 수직변위의 시간이력

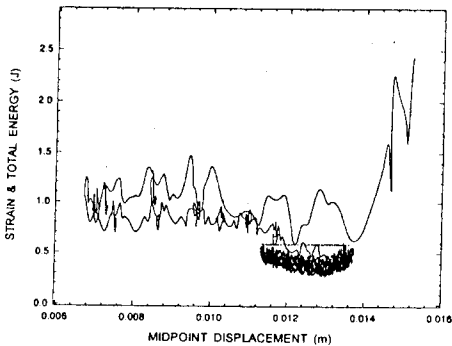


그림 10 총 가용에너지와 변형에너지 선도

하중 작용방향의 반대방향(-)에 snap-through되었던 반면에, 그림 9의 경우에는 거동이 최소 변형점에 도달한 후 하중의 작용방향(+)으로 snap-through 되었음을 알 수 있다. 이 경우에 대한 탄성 변형에너지 곡선(실선)과 총 가용에

너지 곡선(점선)이 그림 10에 나타나 있다. 총 가용에너지 곡선이 좌측에서 우측으로 이동할 때 계의 총 가용에너지가 불안정한 평형점에서의 탄성 변형에너지보다 작게 되어 점선이 좌측(-)에 국한되었던 그림 6의 경우와는 반대로, 이 경우에는 그림 10에서와 같이 총 가용에너지 곡선(점선)이 우측에서 좌측으로, 다시 좌측에서 우측으로 이동하며 낮아진 후, 우측에서 좌측으로 이동할 때 계의 총 가용에너지가 불안정 평형점에서의 변형 에너지보다 작게 되어 총 가용에너지 곡선이 오른쪽에서 왼쪽으로 이동하지 못하게 됨에 따라 점선은 불안정 평형점의 오른쪽에 갇히게 되고 거동은 그림 9에서와 같이 하중 작용방향(+)에 snap-through 되게 된다. 특히 계의 거동이 하중 작용방향의 반대방향(-)에서 snap-through 되는 경우를 비정상 거동(anomalous response)이라고 부르며, 에너지 접근방법을 이용한 보의 거동에 대한 해석은 1자유도 모델의 경우에는 Borino 등¹⁰⁾에 의해, 2자유도 모델의 경우에는 Lee 등⁵⁾에 의해 연구된 바 있다.

4. 맺는말

구형 셸의 중앙에 충격하중이 작용하는 경우에 대한 셸의 탄소성 거동을 유한요소 프로그램을 이용하여 구하였다. 구한 거동의 해석 결과, 셸의 거동은 혼돈거동을 나타냈으며 초기조건이 미소 변화함에 따라 거동특성도 변화하였지만 탄소성보의 유한요소 해석⁴⁾에서와 같은 초기조건에 대한 극도의 민감도는 나타내지 않았고 시간에 대한 거동 특성도 크게 변하지 않고 있음을 알 수 있었다. 한정된 영역에 걸쳐서 분포된 점들로 이루어진 프랑카레 맵은 거동이 혼돈적임을 보여주고 있지만 프랑카레 맵이 일반적으로 가지고 있는 어떠한 프랙탈 구조는 나타내고 있지 않았다. 또한 셸의 거동이 하중의 크기가 변함에 따라 하중의 작용방향으로 또는 하중 작용방향의 반대방향으로 불규칙적으로 snap-through 되는데, 이러한 현상이 소성변형이 발생함에 따라 급격히 감소하는 총 가용에너지와 불안정 평형점에서의

변형에너지의 상대적인 크기에 기인한다는 사실을 에너지선도를 이용하여 규명하였다. 거동 초기에 발생하는 소성변형에 의해 쉘의 기하학적 형상이 바뀔 수 있을 뿐만 아니라 snap-through의 방향이 결정되지만, 이러한 소성변형은 거동간 계산을 통해서만 구할 수 있기 때문에 결국 계의 단기적 및 장기적 거동의 예측은 불가능하게 된다.

감사의 글

본 연구는 94년도 한국과학재단 목적기초연구비(KOSEF 941-1000-003-1) 지원에 의한 연구의 일부로서 재단에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Lee, J-Y, Symonds, P.S., and Borino, G., "Chaotic Response of a 2DOF Elastic-Plastic Beam Model to Short Pulse Loading", J. of Applied Mechanics, pp. 711-721, 1992.
2. Kolsky, H., Rush, P., and Symonds, P. S., "Some Experimental Observations of Anomalous Response of Fully Clamped Beam", Int. J. of Impact Engng, Vol. 11, pp. 445-456, 1991.
3. Li, Q. M., and Yan, G. T., Experimental Results of "Counterintuitive Behavior" of Thin Clamped Beams Subjected to Projectile Impact, Int. J. of Impact Engng, Vol. 11, pp. 341-348, 1991.
4. Symonds, P. S., and Lee, J-Y, "Anomalous and Unpredictable Response to Short Pulse Loading", in Recent Advances in Impact Dynamics of Engineering Structures, ASME, AMD-Vol. 105, pp. 31-38, 1989.
5. Lee, J-Y, and P. S. Symonds, "Extended Energy Approach to Chaotic Elastic-Plastic Response to Impulsive Loading", Int. J. of Mech. Sci., Vol. 34, pp. 139- 157, 1992.
6. Qian, Y., "The Application of Galerkin Models to the Study of Anomalous Elastic-Plastic Dynamic Responses of Structures", Ph.D. thesis, Brown University, Providence, RI, 1994.
7. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS User's Manual, Version 5.3, 1080 Main Street, Pawtucket, RI, 1993.
8. Dowell, E. H., "Observation and Evolution of Chaos in an Autonomous System", ASME J. of Applied Mechanics, Vol. 51, pp. 664-678, 1984.
9. Symonds, P. S., and Wu, T. X., "Counterintuitive Behavior in a Problem of Elastic-Plastic Beam Dynamics", ASME J. of Applied Mechanics, Vol. 52, pp. 517-522, 1985.
10. Borino, G., Perego, U., and Symonds, P. S., "An Energy Approach to Anomalous Damped Elastic-Plastic Response to Short Pulse Loading," J. of Applied Mechanics, Vol. 56, pp. 430-438, 1989.

(접수일자: 1997. 3. 18)