

스텝 하중을 받는 얇은 EP셸 구조물의 비선형 연속응답스펙트럼에 의한 불안정 특성

Instability Characteristic of Nonlinear Running Spectra of Shallow EP Shells under STEP Excitations

김 승 덕*
Kim, Seung-Deog

김 두 리**
Kim, Doo-Ri

요 약

셸형 구조물의 동적 불안정 문제를 다룬 연구결과는 다소 발표되고 있으나, 위상곡면을 이용하여 카오스 생성에 관한 기본적인 현상을 다룬 연구는 거의 없는 실정이다. 동적 비선형 문제에서, 여러 가지 초기조건에 의해 불안정 현상이 민감하게 발생하는 이유를 파악하기 위해서는 위상곡면에서 끌개의 특성을 조사하여 동적 불안정 생성과정을 검토하는 일은 매우 중요하다. 본 연구에서는 얇은 EP 셸이 스텝하중을 받을 때, 직접 좌굴과 간접 좌굴의 발생 경로를 파악하기 위하여 Galerkin 법에 의해 전개된 이산화 방정식을 구한다. 이를 수치해석 기법으로 위상곡선과 연속응답스펙트럼을 구해 동적 불안정 특성을 규명한다.

Abstract

The some papers which deal with the dynamic instability for shell-like structures under the dynamic excitation have been published, but there are few papers which treat the essential phenomenon of the dynamic buckling using the phase plane for investigating occurrence of chaos. In nonlinear dynamic, examining the characteristics of attractor on the phase plane and investigating the dynamic buckling process are very important thing for understanding why unstable phenomena are sensitively originated by various initial conditions. In this study, the direct and indirect snapping of shallow EP shell considering geometrical nonlinearity are investigated by Galerkin method numerically. This finding out the characteristic of the dynamic instability through the phases curves and running response spectrum.

키워드 : 불안정, 동적좌굴, 직접좌굴, 간접좌굴, 위상곡면, 연속 스펙트럼

Keywords : Instability, dynamic buckling, direct snapping, indirect snapping, phases plane, running spectrum

1. 서 론

셸 구조물은 형태 저항형 구조로써, 장스팬 구조물을 가능하게 한다. 기본적인 구조저항 메커니즘은 구조물 자체의 곡률을 이용하여 면외방향으로 작용하는 외력에 대해

서 주로 면내력으로 저항할 수 있게 한 구조 시스템이다. 그러나 하중 레벨에 따라 힘 변형을 주로 하는 불안정 현상이 생겨 불안정 상태의 파괴가 이루어진다. 그 때문에 구조 안정 문제는 셸 구조물의 재하능력을 조사하는데 중심적 과제가 된다.

구조 안정 문제는 외력이 정적으로 작용하는 정적 안정 문제와 동적으로 작용하는 동적 안정 문제로 분류된다.

동적 안정 문제는 여러 분야에서 다양한 연구자에 의해 장기간 연구되고 있다. 최초의 논문으로 1960년 Suhara¹⁾의 연구가 있다. Suhara는 무한 계속 시간의 등분포 스텝

* 정회원 · 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사

Tel: 043-649-1326, Fax: 043-649-1326

E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

** 정회원 · 세명대학교 건축공학과 석사과정

하중을 받는 얇은 구형 셸의 축대칭 변형을 에너지법에 의하여 구하였고, 변위함수의 적절한 선정이 중요하다는 점을 지적 하였다. Budiansky & Roth²⁾는 유한 계속 시간의 등분포 스텝 하중을 받는 얇은 구형 셸의 축대칭 변형을 Galerkin법에 의해 구했다. 이 연구에서는 동적 좌굴 하중의 판정 기준을 미소한 하중 레벨의 증가에 대하여 변위 응답의 급격한 증가를 나타내는 하중 레벨로 제안하였다. 또 형상 파라미터가 5~6을 넘으면, 파수의 증가로 인해 자유도가 증가해야 하며, 비축대칭 변형에 의한 동적 좌굴이 발생한다는 것을 지적하였다고, Humphrey & Bodner³⁾의 해와 비교하였다. Simitses⁴⁾는 전 포텐셜 에너지를 이용한 동적 좌굴의 판정 기준으로 하계 및 상계조건을 제안하였다.

Humphreys, Roth & Zatlors⁵⁾는 해석법 및 Budiansky & Roth의 판정 기준과 비교를 위하여, 충격 하중을 받는 얇은 구형 셸의 실험을 하였다. 그 결과, 이론해가 실험에 의해 측정된 임계값보다 10~20% 높다고 보고 되었다.

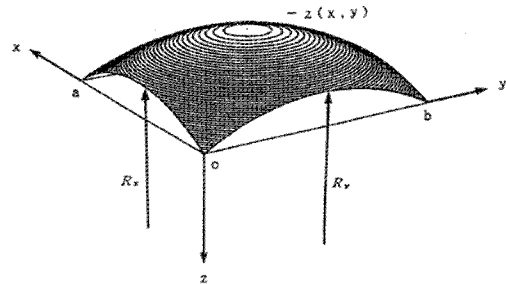
이상의 연구결과들은 동적 좌굴 하중의 경계를 주로 다루고 있다. 셸형 구조물의 동적 불안정은 외력과 구조물의 형상에 따라 직접좌굴 및 간접좌굴 등 매우 복잡한 거동을 하는 것이 일반적이다. 그 중에서도 대칭 변형모드와 비대칭 변형모드와의 연성 작용에 의한 간접좌굴 문제는 초기조건에 민감하게 반응하며, 비선형이 강하게 나타나는 것이 특징이다.

본 논문은 얇은 EP 셸 구조물을 대상으로 동적 불안정의 기본 메커니즘을 파악하기 위하여, 스텝 하중을 받았을 때의 동적 안정 문제를 다룬다. 해석 방법으로는 기하학적 비선형을 고려하여 비선형 운동방정식을 유도하고, 이를 Galerkin 법을 이용하여 이산계 비선형 운동방정식을 구한다. Newmark- β 법에 의한 수치적분을 이용하여 비선형 변위응답을 구한다. 동적 직접좌굴 및 동적 간접좌굴의 발생경로를 파악하기 위하여 비선형 시각력 응답 곡선과 이들의 위상면에서 끌개(attractor) 특성을 조사한다. 또한 비선형 변위 응답으로 FFT(Fast Fourier Transform)에 의한 연속응답스펙트럼을 구해 2자유도의 얇은 EP셸의 동적 불안정 특성에 관해서 분석한다.

동적 좌굴 하중을 EP셸의 정적 고전 좌굴 하중의 형상 파라미터 λ_s 를 이용하여 무차원화하는 것으로 비교 검토한다.

2. 얇은 셸의 비선형 운동방정식

2.1 얇은 셸의 기초 방정식



〈그림 1〉 해석 모델

해석대상 모델은 〈그림 1〉에 나타나는 사각형의 투영면을 가지는 2차 곡면의 얇은 셸이다.

셸의 x, y 방향의 주곡률 반경을 R_x, R_y 로 하여 얇은 조건을 이용하여 셸의 형상 방정식을 (1)식과 같이 정의한다.

$$z(x, y) = \frac{x(x-a)}{2R_x} + \frac{y(y-b)}{2R_y} \tag{1}$$

즉, (1)식보다 셸의 기초 방정식의 유도에 있어 x, y 방향의 곡률을 주곡률로 하는 곡률선 좌표계를 이용할 수 있다. 여기서 주곡률 반경 R_x, R_y 를 이용하여 주곡률비 λ 를 (2)식으로 정의한다.

$$\lambda = \frac{R_x}{R_y} \tag{2}$$

주곡률비 λ 를 도입하면 λ 값의 변화에 의해 셸 형상은 각각 EP 셸, 원통 셸, HP 셸로 나타난다.

변위 w와 응력함수 F를 이용하여 나타내어진 (3)식, (4)식은 얇은 셸의 기초 방정식이다

평형 조건식 :

$$D\nabla^4 w - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{1}{R_y} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{1}{R_x} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P_z(t) = 0 \tag{3}$$

적합 조건식:

$$\frac{1}{Eh} \nabla^4 F + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{R_y} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{R_x} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$$

얇은 셀의 일반화된 좌굴해석을 위하여 (5)식과 같은 무차원 파라미터를 도입한다.

$$\xi = \frac{x}{a}, \quad \eta = \frac{y}{a}, \quad \tau = \sqrt{\frac{E}{\rho h R_x}} t, \quad w^x = \frac{w}{h}, \quad (5)$$

$$F^x = \frac{F}{Eh^3}, \quad \lambda = \frac{R_x}{R_y}, \quad c = \frac{a}{b}, \quad d = \frac{h}{R_x}, \quad e = \frac{a}{R_x}$$

(5)식을 이용해 (3)식, (4)식의 기초방정식을 무차원화하면 (6)식, (7)식이 된다.

평형 조건식:

$$\frac{1}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \right)^2 w^x - \frac{\partial^2 w^x}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 F^x}{\partial \eta^2} \quad (6)$$

$$+ 2 \frac{\partial^2 w^x}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial^2 F^x}{\partial \eta \partial \xi} - \frac{\partial^2 w^x}{\partial \eta^2} \frac{\partial^2 F^x}{\partial \xi^2}$$

$$- \frac{e^2}{d} \left(\lambda \frac{\partial^2 F^x}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 F^x}{\partial \eta^2} \right)$$

$$+ \frac{e^4}{d^3} \frac{\partial^2 w^x}{\partial \tau^2} - \frac{e^4}{Ed^4} p_c \left(\sqrt{\frac{\rho h R_x}{E}} \tau \right) = 0$$

적합 조건식:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \right)^2 F^x + \frac{\partial^2 w^x}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w^x}{\partial \eta^2} - \left(\frac{\partial^2 w^x}{\partial \xi \partial \eta} \right)^2 \quad (7)$$

$$+ \frac{e^2}{d} \left(\lambda \frac{\partial^2 w^x}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w^x}{\partial \eta^2} \right) = 0$$

본 논문에서는 (8)식과 (9)식의 경계조건을 채택한다.

CASE-A : 비구속 모델

$$x=0, a \text{에 대해 } N_x=0, v=0 \quad (8.a)$$

$$y=0, b \text{에 대해 } N_y=0, v=0 \quad (8.b)$$

CASE-B : 구속 모델

$$x=0, a \text{에 대해 } u=0, v=0 \quad (9.a)$$

$$y=0, b \text{에 대해 } u=0, v=0 \quad (9.b)$$

2.2 Galerkin법에 따른 이산화 기초방정식

무차원화된 기초방정식을 ξ, η, τ 에 대한 w^*, F^* 의 편미분방정식이므로 τ 만에 관한 대수방정식에 변환시키기 위해 Galerkin법을 적용한다.

Galerkin법의 적용의 개요는 다음과 같다. 면외방향의 경계조건을 만족하도록 w^* 를 가정해, 적합조건 (7)식을 면내방향의 경계조건을 만족하게 하는 F^* 의 특해 및 제차해를 요구한다. 구하여진 w^*, F^* 를 (7)식에 대입해 이산화한다.

Step 1 : 변수분리하면 ;

$$w^* = \sum_i D_i(\tau) f_i(\xi, \eta), \quad (10)$$

$$F^* = F_b^* + F_c^*$$

Step 2 : 기초방정식에 대입하면 ;

$$G(w^*, F^*) = 0 \quad (11)$$

Step 3 : 이산화하면 ;

$$\int_0^1 \int_0^c G(w^*, F^*) f_i(\xi, \eta) d\xi d\eta = 0 \quad (12)$$

본 논문에서 이용하는 단순지지의 경계조건, 즉 면외 경계조건을 만족하도록 변위 w^* 를 (13)식과 같은 Fourier 급수로 정의한다.

$$w^* = \sum_m \sum_n D_{mn}(\tau) \sin m\pi\xi \sin n\pi\eta \quad (13)$$

(m, n은 양의정수)

2.3 고전 좌굴 하중에 의한 외력항의 무차원화

본 절에서는 하중항을 등분포 하중으로 받는 구형 셀의 고전 좌굴 하중으로 무차원화한다. 정적 고전 좌굴 하중을 무차원량으로 이용해 무차원화 한 고전 좌굴 하중 R_x , P_{cr} 을 구하면 (14)식으로 나타낸다.

$$P_{cr} = \frac{2Ed^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (14)$$

분포하중 $P(\tau^*)_z$ 를 정적 고전 좌굴 하중 로 무차원하여 Fourier 급수로 전개해두면 (15)식과 같다.

$$\frac{P_z(\tau^*)}{cP_{cr}} = \sum_r \sum_s \overline{P_{rs}}(\tau^*) \sin r\pi\xi \sin s\pi\eta \quad (15)$$

무차원화 된 지진동 가속도를 구하기 위해, (14)식의 정적 고전 좌굴 하중을 질량 및 가속도항으로 분리하여 정리하면, 동적 고전 좌굴 하중 cA_{cr} 는 (16)식이 된다.

$$cA_{cr} = \frac{2d}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (16)$$

3. 얇은 EP 셀의 동적연성좌굴

3.1 정적 불안정

본 절에서는 얇은 구조물의 연성응답거동을 조사하기 위해, 2자유도로 나타낸 얇은 EP셀을 해석모델로 한다. 따라서 (13)식의 변위 모드에 대해 2개의 모드를 채용한다. 즉 제 1변위 모드로는 (15)식 하중 모드와 일치하는 모드를 선택하고, 제 2변위 모드로는 제 1변위 모드이외의 모드에서 가장 좌굴 현상이 일어나기 쉬운 모드를 선택한다. 즉 제 1하중 모드로는 $r=1, n=1$ 를 채용하며, 따라서 제 1변위 모드로서는 $m=1, n=1$ 그리고 제 2변위 모드는 $m \neq 1, n \neq 1$ 인 모드에서 정적 좌굴 하중이 제일 낮은 모드를 선택한다. 제 2변위 모드의 선택방법에 의해서 좌굴거동이 구분 된다. 즉 제 2변위 모드가 대칭 모드 ($m=\text{odd}$ and $n=\text{odd}$)라면 뿔좌굴 현상이, 비대칭 모드 ($m \neq \text{odd}$ and $n \neq \text{odd}$)라면 분기좌굴 현상이 발생한다.

해석하는 모델의 형상은 파라메타, 즉 $\lambda = R_x/R_y, c=a/b, d=h/R_x, e=a/R_x$ 등에 의해 분류된다. 본 논문에서는 $\lambda=1, c=1$, 즉 정방형의 투영면을 가지는 EP셀을 이용해, d 와 e 및 경계조건을 변화시켜 24개의 모델을 이용한다.

여기서 EP셀의 형상을 결정하는 기준으로서, 구형 셀의 형상 파라메타를 무차원화하여 (17)식의 형상 파라메타 λ_s 를 도입한다.

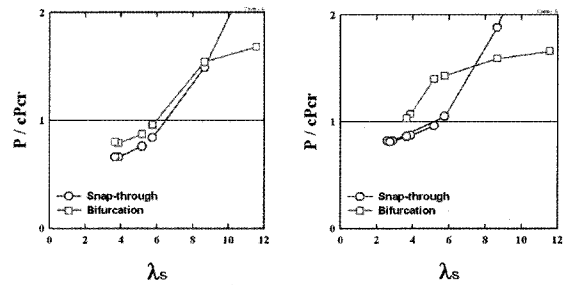
$$\lambda_s = \frac{\sqrt{12(1-\nu^2)}}{\sqrt{d}} \cdot \sin^{-1} \frac{e}{2} \quad (17)$$

각 모델을 비교한 형상 파라메타의 λ_s 값은 <표 1>과 같이 된다.

<표 1> 형상 파라메타 λ_s 의 값

| $d = \frac{h}{R_x}$ | $e = a / R_x$ | | | |
|---------------------|---------------|-------|-------|-------|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
| 0.001 | 2.876 | 5.758 | 8.655 | 11.58 |
| 0.005 | 1.286 | 2.575 | 3.871 | 5.177 |
| 0.010 | 0.909 | 1.821 | 2.737 | 3.660 |

각 모델의 정적 좌굴 하중과 형상 파라메타 λ_s 와의 관계를 나타내면 <그림 2>이 된다. CASE-A의 경우는 λ_s 가 3내지 4로부터 뿔좌굴 현상이, 8내지 9로부터는 분기좌굴 현상이 나타나고 있다. CASE-B의 경우는 λ_s 가 2내지 3으로부터 뿔좌굴 현상이, 7내지 8로부터는 분기좌굴 현상이 나타난다.



(a) CASE-A

(b) CASE-B

<그림 2> 정적 좌굴 하중

여기서 뿔좌굴 현상 및 분기좌굴 현상을 조사하기 위해 다음과 같은 4개의 모델을 선택한다.

- Model-I : CASE-A, $\lambda_s=5.76$ ($d=0.001, e=0.2$)
- Model-II : CASE-B, $\lambda_s=5.76$ ($d=0.001, e=0.2$)
- Model-III : CASE-A, $\lambda_s=11.58$ ($d=0.001, e=0.4$)
- Model-IV : CASE-B, $\lambda_s=11.58$ ($d=0.001, e=0.4$)

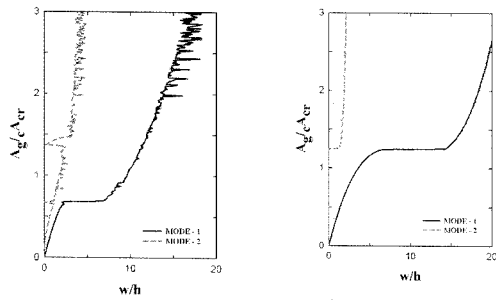
3.2 스텝 하중에 의한 불안정

주기성이 없는 스텝 하중에 의한 동적 외력에서의 동적 불안정 현상을 분석한다. 수치계산을 실시할 때, 시간영역에서의 적분법은 Newmark's- β 법을 이용하고, $\beta=1/4$, 즉 평균 가속도법을 이용하여 비선형 운동방정식의 수렴 계산에 의한 비선형 응답곡선을 구한다. 저차 모드의 고유 주기인 1차 고유 주기를 T_0 라 한다면, 시간간격을 Δt

$=T/100$. 계속시간을 $100T_0$ 로 한다.

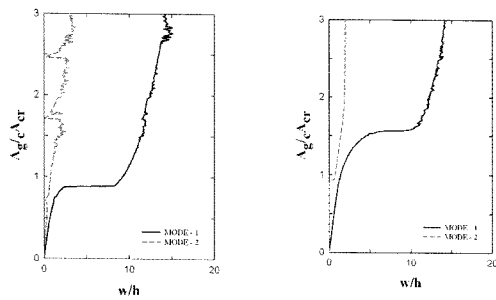
본 연구에서는 동적 좌굴 현상의 판정을 Budiansky-Roth의 판정법을 이용하며, 스텝 하중을 받았을 경우, 각 하중레벨로의 시각력 곡선으로부터 얻을 수 있던 최대 변위응답을 <그림 3>부터 <그림 6>에 나타내었다.

대칭 모드에서 제 1모드, 제 2모드 모두 연성 응답을 나타내고 있기 때문에 동적 뒹좌굴 발생의 판정은 제 1모드의 변위가 급격하게 증가하는 Direct snapping 현상을 일으키는 하중레벨을 동적 뒹좌굴 이라한다. 그러나 비대칭 모드에서는 상계에서는 초기부정에 의해 연성응답을 나타낸다.



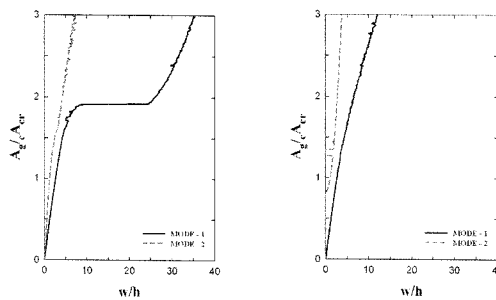
(a) 대칭 모드 (1,3) (b) 비대칭 모드 (5,8)

<그림 3> 하중-변위곡선, Model - I



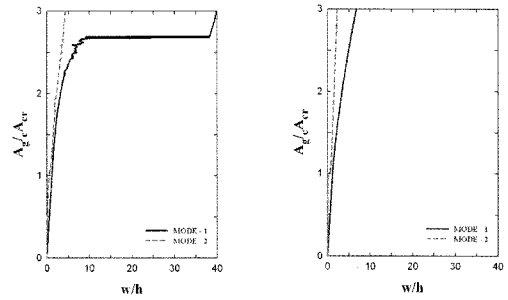
(a) 대칭 모드 (1,3) (b) 비대칭 모드 (1,4)

<그림 4> 하중-변위곡선, Model - II



(a) 대칭 모드 (1,3) (b) 비대칭 모드 (1,8)

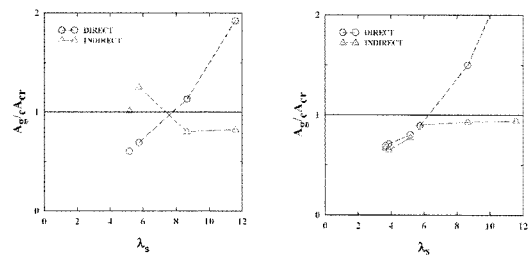
<그림 5> 하중-변위곡선, Model - III



(a) 대칭 모드 (3,3) (b) 비대칭 모드 (1,8)

<그림 6> 하중-변위곡선, Model - IV

따라서 본문에서는 동적 분기좌굴의 발생의 판정은 제 2모드의 변위가 확대하는 하중레벨 즉, Indirect snapping 현상을 일으키는 하중레벨을 동적 분기좌굴 이라 한다. 각 모델 비대칭 모드의 Model-I 은 경계면에서의 면내방향의 변위가 구속 되어 있지 않은 얇은 셀이기 때문에 제 2모드의 발생과 동시에 Snapping 현상이 나타난다. Model-III에서는, 제 2모드에 의한 분기 현상이 발생해도 제 1모드에 영향을 주지 않고, 구조물이 전체적으로 Snapping 현상이 일어나기 어렵다는 것이 나타난다.



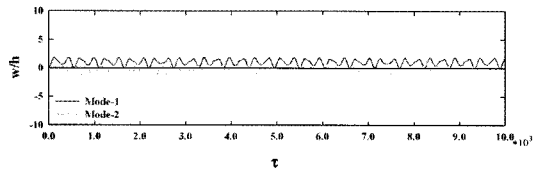
(a) CASE-A (b) CASE-B

<그림 7> 동적 좌굴 하중

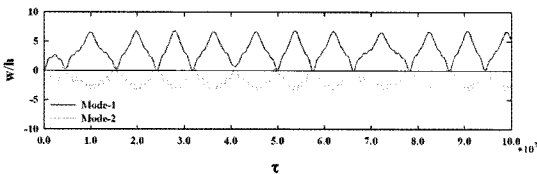
스텝 하중을 받았을 경우 각 모델의 동적 좌굴 하중을 형상 파라미터 λ_s 의 관계를 <그림 7>에 나타내었다. 비구속의 경계 조건을 가지는 CASE-A에서는, λ_s 가 약 5로부터 대칭 모드에 의한 동적 뒹좌굴이, 7 내지 8부터는 비대칭 모드에 의한 동적 분기좌굴을 나타낸다. 구속의 경계조건을 가지는 CASE-B에서는, λ_s 가 3 내지 4로부터 비대칭 모드에 의한 동적 분기좌굴이 나타나고, 전 모델에서는 Indirect Snapping 현상이 강하게 나타난다.

비선형 변위응답의 특성을 분석하기 위해 pre-buckling 및 post-buckling 레벨에서 시각력 응답곡선

을 비교하였다. 해석 대상 모델은, 동적 뿔좌굴 모델로서 Model-I (CASE-A, $\lambda_s=5.76$)의 대칭 모드(제 2모드가 $m=1, n=3$), 동적 분기좌굴 모델로서 Model-III(CASE-A, $\lambda_s=11.58$)의 비대칭 모드(제 2모드가 $m=1, n=8$)를 도입하였다.

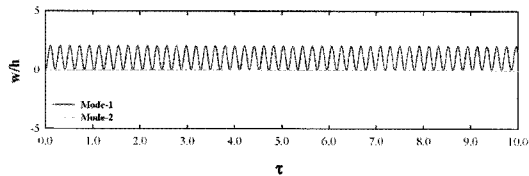


(a) pre-buckling ($\lambda=0.6$)

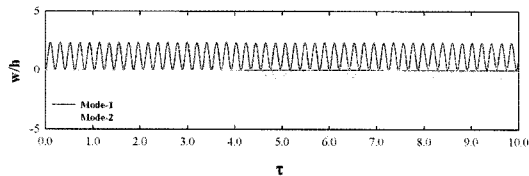


(b) post-buckling ($\lambda=0.7$)

〈그림 8〉 시각력 변위응답 곡선 (Model - I)



(a) pre-buckling($\lambda=0.80$)



(b) post-buckling($\lambda=0.90$)

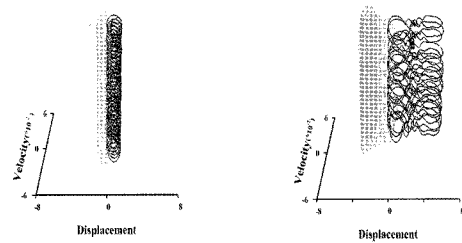
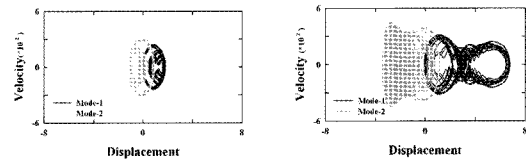
〈그림 9〉 시각력 변위응답 곡선 (Model - III)

Model-I ($\lambda_s=5.76$)에서는 동적 좌굴하중 보다 낮은 하중레벨인 pre-buckling은 0.60으로, 높은 하중레벨인 post-buckling은 0.70로 선택하고, 시각력 변위응답 곡선을 〈그림 8〉에 나타내었다. 또, Model-III($\lambda_s=11.58$)에서는 pre-buckling 레벨은 0.80로, post-buckling 레벨은 0.90를 선택하고, 시각력 변위응답 곡선을 〈그림 9〉에 나타내었다.

Model-I 은 pre-buckling에서는 작은 진폭을 나타내고 있으나, post-buckling에서는 Direct Snapping 현상

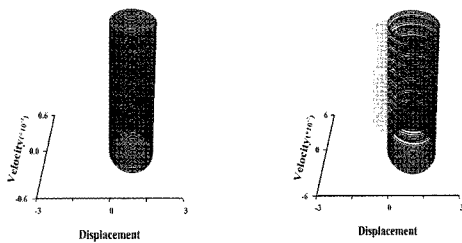
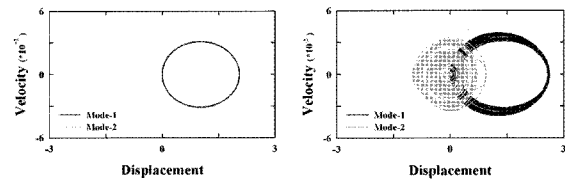
으로 인해 진폭의 크기가 급격히 커지는 것이 나타난다.

Model-III의 post-buckling에서는 $\tau=4.5 \times 10^3$ 까지의 초기진동은 pre-buckling과 유사한 진동패턴을 나타내고 있으나, τ 가 4.5×10^3 를 지나면서 제 2모드의 진폭이 생성되지만 제 1모드에 큰 영향을 주지 않고 비연성작용을 나타낸다.



(a) pre-buckling ($\lambda=0.6$) (b) post-buckling ($\lambda=0.7$)

〈그림 10〉 변위-속도 위상곡선 (Model - I)



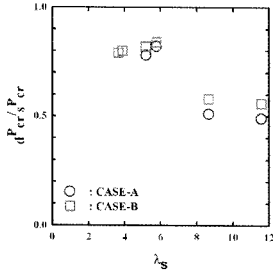
(a) pre-buckling($\lambda=0.80$) (b) post-buckling($\lambda=0.90$)

〈그림 11〉 변위-속도 위상곡선 (Model - III)

〈그림 10〉과 〈그림 11〉는 비선형 시각력 응답결과를 분석하기 위해 pre-buckling 및 post-buckling 레벨에서 변위-속도의 위상곡면을 비교하였다.

Model-I 의 pre-buckling일 때는 단일궤도로 연결되어 끌개가 한계순환을 나타내고 있으나, post-buckling에서는 비선형의 증폭으로 인해 위상곡선의 궤도는 중복

되지 않는 새로운 궤도를 만들며 카오스를 생성한다. 초기 진동 궤도와 Snapping 후의 궤도에서는 제 1모드의 형상이 단일원에서 2개의 원으로 연결된 모양으로 변하는 것이 나타난다. Model-III의 post-buckling에서는 Indirect Snapping로 인해 위상곡선의 궤도는 제 1모드의 끌개는 제 2모드의 끌개에 영향을 받지 않고 한계순환을 한다.

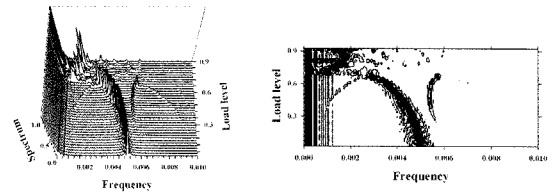


〈그림 12〉 좌굴 하중

이상으로 얻을 수 있던 동적 좌굴 하중을 각 모델의 정적 좌굴 하중으로 표준화하여 〈그림 12〉에 나타내었다. 동적 좌굴 하중을 정적 좌굴 하중과 비교하는 것으로, 형상 파라미터 λ_s 의 6 내지 8을 경계로서, 좌굴 하중레벨이 되는 양상이 나타난다. 즉, 스텝 하중의 경우에 Direct snapping이 약 75-85%, Indirect snapping이 약 50-60%이다.

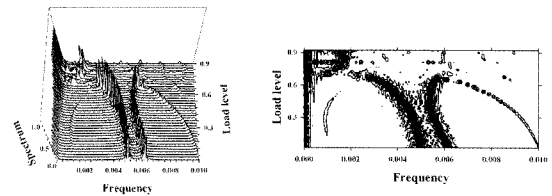
2 자유도를 가지는 얇은 셀의 동적 좌굴거동을 파악하기 위해, 비선형 변위응답을 FFT(Fast Fourier Transform)해석을 이용하여 동적 연속 응답의 Spectra 해석을 실시하였다. 해석 대상 모델은, 뿔좌굴 모델로서 Model-I (CASE-A, $\lambda_s=5.76$)의 대칭 모드(제 2모드가 $m=1, n=3$), 분기좌굴 모델로서 Model-III(CASE-A, $\lambda_s=11.58$)의 비대칭 모드(제 2모드가 $m=1, n=8$)를 도입한다.

Model-I ($\lambda_s=5.76$)에 대해서 하중레벨마다의 연속 Spectra인 Running Spectra을 〈그림 13〉와 〈그림 14〉에 나타낸다. 또, Model-III($\lambda_s=11.58$)에 대해서 Running Spectra을 〈그림 15〉와 〈그림 16〉에 나타낸다.



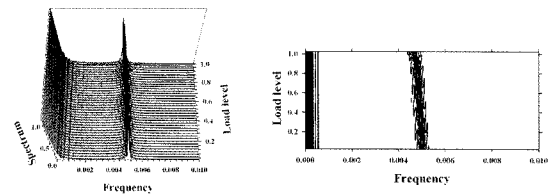
(a) 입체도 (b) 등고선도

〈그림 13〉 연속스펙트럼 (Model-I, $0\tau-10000\tau$), 제 1모드



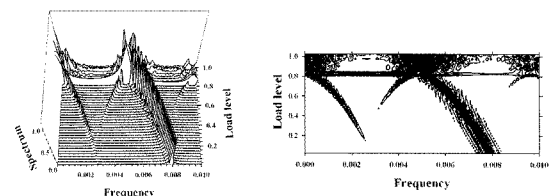
(a) 입체도 (b) 등고선도

〈그림 14〉 연속스펙트럼 (Model-I, $0\tau-10000\tau$), 제 2모드



(a) 입체도 (b) 등고선도

〈그림 15〉 연속스펙트럼 (Model-III, $0\tau-10000\tau$), 제 1모드



(a) 입체도 (b) 등고선도

〈그림 16〉 연속스펙트럼 (Model-III, $0\tau-10000\tau$), 제 2모드

4. 결론

본 연구에서는 수직방향의 스텝 하중을 받는 2자유도 EP셀 모델의 동적 불안정 현상을 파악하였다.

동적 하중을 받는 EP셀의 형상 파라메타 λ_s 와 좌굴 하중의 관계를 비교하면 다음과 같다.

1) 스텝 하중하에 있어서의 동적 좌굴은 CASE-A에서는 λ_s 가 약 5부터 동적 뒤틀좌굴이, 7내지 8에서는 동적 분기좌굴이 발생하고, CASE-B에서는 λ_s 가 3내지 4부터 동적 분기좌굴이 발생한다.

2) 동적 좌굴 하중을 정적 좌굴 하중으로 표준화하면, Direct snapping은 약 75-85%, Indirect snapping이 약 50-60%가 된다.

3) 위상곡면의 분석결과, Model-I은 제 1모드와 제 2모드가 서로 간섭하며 카오스가 생성된다. 그러나 Model-III은 제 2모드가 제 1모드에 영향을 주지 못하고 독자적으로 활동한다.

4) 비선형 변위응답을 Running Spectra 분석하여 탁월 진동수의 변화를 비교하면, Model-I에서는 고조화 공진(super-harmonic resonance), Model-III에서는 분수조화 공진(sub-harmonic resonance)이 나타난다.

-감사의 글-

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호# '06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

-참고 문헌-

1. Suhara, J., "Snapping of shallow spherical shells under static and dynamic loadings," ASRL TR 76-4, Aeroelastic and Structures Research Laboratory, Cambridge, Mass., June 1960.
2. Budiansky, B., and Roth, R.S., "Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells," Collected Papers on Instability of Shells Structures, NaSA TND-1510, Washington, D.C., 1962, 597-606.

3. Humphreys, J.S., and Bodner, S.R., "Dynamic buckling of shallow shells under impulsive loading," J.Eng. Mech. Div., ASCE, 88,Em2, 1962, 17-36.
4. Simitses, G.J., "Dynamic snap-through buckling of shallow spherical caps." Proc. Seventh AIAA/ASME Structures and Materials Conference, Cocoa Beach, Fla., April 1966, 112-124.
5. Humphreys, J.S., Roth, R.S., and Zatlars, J., "Experiments on Dynamic buckling of shallow spherical shells under shock loading," AIAA J., 3, 1, 1965, 33-39.
6. 김승덕, "기하학적 비선형을 고려한 얇은 타원포물 곡면 셀의 동적 불안정 현상," 대한건축학회 논문집, 10, 6, 1994, pp,121-132.
7. 김승덕, "얇은 타원포물곡면셀의 동적 불안정 현상의 규명을 위한 비선형 동적 응답의 스펙트럼 분석," 전산구조공학, 제8권, 제 2호, 1995.6., pp,153-132.

- ▶ 접수일자 : 2009년 11월 17일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 2월 2일
- ▶ 게재 확정일자 : 2010년 2월 10일