

주기적인 강성분포를 갖는 구형셸의 좌굴해석

Buckling Analysis of Spherical Shells With Periodic Stiffness Distribution

정 환 목*

Jung, Hwan-Mok

Abstract

Researches on spherical shell which is most usually applied have been completed by many investigators already and generalized numerical formula was derived. But the existent researches are limited to those on spherical shell with isotropic or orthotropic roof stiffness, periodic distribution of roof stiffness that can be caused by spherical and latticed roof system is not considered.

Therefore, the object of this study is to develop a structural analysis program to analyze spherical shells that have periodicity of roof stiffness distribution caused by latticed roof of large space structure, grasp buckling characteristics and behavior of structure.

Keyword : Spherical shells, Periodic Stiffness Distribution, Buckling analysis

1. 서론

대공간 구조물의 구조시스템은 구조해석능력의 발전으로 인하여 연속체인 셸구조에서 이산체 격자 셸구조로 그 구조시스템이 변화하고 있다. 그러나, 이산체인 격자셸 구조시스템은 사용재료의 경량화 및 단면의 최소화로 불안정 현상인 좌굴이 발생한다. 이런 격자셸 구조물은 유한요소법을 이용하여 거동 및 좌굴현상 등을 파악할 수는 있지만, 설계자의 입장에서 보면 설계초기에 많은 시간과 노력이 따르게 된다. 한편 대공간 지붕구조인 이산체 격자셸을 거시적 관점에서 그 거동 및 좌굴특성을 간단하게 파악할 수만 있다면, 설계자의 입장에서 보면 설계초기단계에 다양한 형태의 대공간 모델을 설계에 반영해 볼 수 있는 이점이 있다.

현재까지 이산체 격자셸의 연속체 셸해석에 의한 좌굴하중식 및 좌굴판정의 기준이 되는 변수에 대해서 몇 가지의 제안이 있어왔다. 그러나 기존의 연구^{2),3),5)}는 구형셸의 지붕강성이 등방성이거나 직

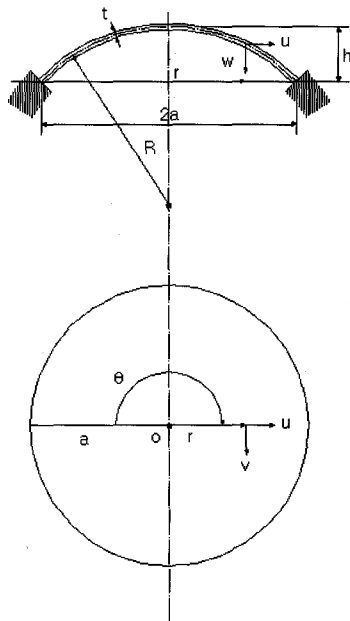
교이방성인 경우에 한하며, 구형셸의 지붕강성이 주기성을 갖는 연구는 아직 진행되고 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 격자셸의 격자형태가 2방향 그리드(Grid)인 경우에 나타나는 강성의 주기성을 갖는 구형 격자 셸을 연구 대상으로 하며, 라이즈-스팬비에 따른 6종류의 해석모델에 대한 좌굴특성을 파악하고, 그 형상에 따른 주기적 강성분포의 좌굴하중에 미치는 영향에 대해서 검토한다.

2. 형상 및 해석모델

2.1 형상모델

<그림 1>은 균일한 외압을 받는 양단고정의 구형셸의 형상을 나타낸다. 그림에서 R 은 곡률반경, a 는 셸의 저면반경, t 는 셸의 두께이고, h 는 셸의 높이이다. 그리고, 좌표계는 구형셸 저면의 중심을 원점으로 가지는 극좌표계(r, θ)를 설정하여, 연직방향 z 좌표는 우수계를 취하여 하방향을 +값으로 정한다. r, θ 와 z 방향의 변위성분은 각각 u, v 와 w 로 나타낸다.

* 정회원·경동대학교 건축공학부 교수



<그림 1> 구형셸의 형상

2.2 해석모델

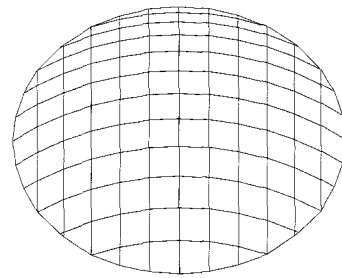
본 연구에서는 대공간 격자셸의 지붕구조를 형성하는 여러 형태 중에서도 특히 원주방향으로 현저하게 주기적 강성을 가지는 2방향 그리드(Grid)를 갖는 <그림 2(a)>에 나타나는 격자 구형셸을 연구 대상으로 한다.

<그림 2(b)>는 해석모델의 단면형상으로, b는 격자부재의 단면폭, d는 격자부재의 단면높이이며, L은 격자의 대표부재길이를 나타낸다.

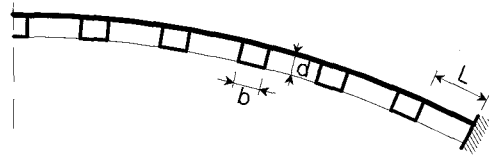
그리고 <표 1>은 형상계수(λ)에 따른 해석모델의 형상을 나타낸다. 여기서, 형상계수 λ 는 강성분포가 주기성을 갖는 구형셸의 일반적인 형상계수가 제안되어 있지 않으므로 본 연구에서는 야마다⁶⁾에 의해 제안된 등방성 구형셸의 형상계수(λ)를 도입한다.

즉, 그 형상계수 λ 는 $a/R^2 \cdot \sqrt[4]{K/D}$ 로 표현되며 여기서 K는 등가축강성, D는 등가휨강성을 나타낸다.

본 연구에서는 곡률반경 R을 변화시켜 표에서 보여 지는 6종류의 해석모델을 선정했다. 즉, 표1에서 알 수 있는 바와 같이 형상계수(λ)값은 7과 15 이내의 값을 가지며 형상계수값이 클수록 라이즈비가 높아지는 것을 알 수 있다.



(a) 3차원 형상



(b) 단면형상

<그림 2> 본 연구의 해석모델

<표 1> 형상계수(λ)에 따른 해석모델 및 그 형상

모델명	곡률반경(R)	형상계수(λ)	해석모델의 형상
	부재길이(L)		
L-1	1580mm	7.73	
	50.31mm		
L-2	1280mm	8.59	
	50.47mm		
L-3	880mm	10.36	
	51.02mm		
L-4	680mm	11.79	
	51.78mm		
L-5	580mm	12.76	
	52.55mm		
L-6	480mm	14.02	
	54.01mm		

2.3 격자셸의 등가강성 모델화

이산체인 격자셸을 연속체로 하여 해석하기 위하여 격자셸의 등가강성을 구할 필요가 있다. 본 연구에서는 2방향 그리드를 갖는 격자셸의 면내 및 면외 등가강성은 日置의 등가강성식⁸⁾을 이용하여 구하며, 후술하는 <3. 해석프로그램의 정식화>에서 면내강성은 K_{ij} , 면외강성은 D_{ij} 로서 표기하여 나타낸다.

3. 해석프로그램의 정식화

3.1 기초방정식

3.1.1 변형도-변위 관계식

본 해석모델인 구형셀의 변형도-변위관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 e_r &= \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \\
 e_\theta &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + u \right) - \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \\
 e_{r\theta} &= \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \\
 \rho_r &= - \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\
 \rho_\theta &= - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \\
 \rho_{r\theta} &= - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial w}{r \partial \theta} \right) = - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)에서 대표적으로, e_r 은 r 방향의 축변형도, ρ_r 은 r 방향의 휨변형도를 나타낸다.

3.1.2 응력-변형도 관계식

본 연구에서의 2방향 그리드(Grid)를 갖는 구형셀의 면내응력-변형도의 관계식은 다음 식과 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$n_{ij} = K_{ij} \cdot e_{ij} \quad (i, j = 1 \sim 3) \tag{4}$$

면내강성요소(K_{ij} , $i, j = 1 \sim 3$)는 원주방향의 강성변화를 고려하여 다음과 같이 θ 를 변수로 하여 나타낸다.

$$K_{ij} = K(K_{ij1} + K_{ij2} \cos 4\theta + K_{ij3} \sin 4\theta) \tag{5}$$

여기서, K 는 2방향 그리드 격자셀에서 θ 가 0°일 때의 대표적인 프레임의 축강성으로 그 값은 EA/L 이다.

그리고, 2방향 그리드(Grid)를 갖는 구형셀의 면외응력-곡률의 관계식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{ij} = D_{ij} \cdot \rho_{ij} \quad (i, j = 1 \sim 3) \tag{6}$$

면외강성요소(D_{ij} , $i, j = 1 \sim 3$) 역시 원주방향 θ 의 강성변화를 고려하여 다음과 같이 θ 를 변수로 하여 나타낸다.

$$D_{ij} = D(D_{ij1} + D_{ij2} \cos \theta + D_{ij3} \sin \theta) \tag{7}$$

여기서, D 는 θ 가 0°일 때의 대표적인 프레임의 휨강성으로 그 값은 EI/L 이다.

3.1.3 비선형 평형방정식

가상일의 원리를 이용하여 구형셀의 비선형 평형방정식을 유도한다. 아래 식(8)은 각각 r방향, θ 방향 그리고 Z방향(휨모멘트) 힘의 평형방정식을 고차항을 무시하여 정리한 것이다. 단, q 는 구심의 압이다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial r}(rn_r) + \frac{\partial}{\partial \theta}(n_{r\theta}) - n_\theta &= 0 \\
 \frac{\partial}{\partial \theta}(n_\theta) + \frac{\partial}{\partial r}(m_{r\theta}) - n_{r\theta} &= 0 \\
 \frac{\partial^2}{\partial r^2}(r m_r) + 2 \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta}(m_{r\theta}) - \frac{\partial}{\partial r}(m_\theta) \\
 + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}(m_\theta) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(m_{r\theta}) + \frac{r}{R}(n_r + N_\theta) \\
 + \frac{\partial}{\partial r}(r n_r \frac{\partial w}{\partial r} + n_{r\theta} \frac{\partial w}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(n_{r\theta} \frac{\partial w}{\partial r} \\
 + n_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta}) + q \cdot r &= 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

3.2 기초방정식의 무차원화

3.1절에서 유도한 구형셀의 기초방정식을 해석의 편이를 위해서 이 절에서는 무차원화하여 서술한다. 경선방향 r의 좌표는 구형셀의 반경 a에 의해 무차원화된 $\xi = r/a$ 로 표시한다.

그리고, r, θ 및 z 방향의 변위 u, v, w 는 다음과 같이 변위 U, V 및 W 로 무차원화한다.

$$\begin{aligned} U &= \frac{a}{h^2} u \rightarrow u = \frac{h^2}{a} U \\ V &= \frac{a}{h^2} v \rightarrow v = \frac{h^2}{a} V \\ W &= \frac{w}{h} \rightarrow w = h W \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 h 는 구형셀의 높이이다.

면내변형도 및 곡률의 무차원화는,

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{a^2}{h^2} \epsilon_r \rightarrow \epsilon_r = \frac{h^2}{a^2} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta &= \frac{a^2}{h^2} \epsilon_\theta \rightarrow \epsilon_\theta = \frac{h^2}{a^2} \epsilon_\theta \\ \epsilon_{r\theta} &= \frac{a^2}{h^2} \epsilon_{r\theta} \rightarrow \epsilon_{r\theta} = \frac{h^2}{a^2} \epsilon_{r\theta} \\ \gamma_r &= \frac{a^2}{h} \rho_r \rightarrow \gamma_r = \frac{h}{a^2} \rho_r \\ \gamma_\theta &= \frac{a^2}{h} \rho_\theta \rightarrow \gamma_\theta = \frac{h}{a^2} \rho_\theta \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{a^2}{h} \rho_{r\theta} \rightarrow \gamma_{r\theta} = \frac{h}{a^2} \rho_{r\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 그리고 면내응력 및 면외응력은 원주방향 θ 가 0일 때의 대표축강성 K 및 대표휨강성 D 를 대입하여 다음과 같이 무차원화한다.

$$\begin{aligned} N_r &= \frac{a^2}{h^2} \frac{1}{K} n_r \rightarrow n_r = \frac{h^2}{a^2} K N_r \\ N_\theta &= \frac{a^2}{h^2} \frac{1}{K} n_\theta \rightarrow n_\theta = \frac{h^2}{a^2} K N_\theta \\ N_{r\theta} &= \frac{a^2}{h^2} \frac{1}{K} n_{r\theta} \rightarrow n_{r\theta} = \frac{h^2}{a^2} K N_{r\theta} \\ M_r &= \frac{a^2}{h} \frac{1}{D} m_r \rightarrow m_r = \frac{h}{a^2} D M_r \\ M_\theta &= \frac{a^2}{h} \frac{1}{D} m_\theta \rightarrow m_\theta = \frac{h}{a^2} D M_\theta \\ M_{r\theta} &= \frac{a^2}{h} \frac{1}{D} m_{r\theta} \rightarrow m_{r\theta} = \frac{h}{a^2} D M_{r\theta} \end{aligned} \quad (12)$$

이상의 무차원화값을 적용한 변형-변위관계식은

아래 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\partial U}{\partial \xi} - 2W + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial \xi} \right)^2 \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{\xi} \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{U}{\xi} - 2W + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\xi} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right)^2 \\ \epsilon_{r\theta} &= \frac{\partial V}{\partial \xi} - \frac{V}{\xi} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial W}{\partial \xi} \frac{\partial W}{\partial \theta} \\ \gamma_r &= -\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \\ \gamma_\theta &= -\left(\frac{1}{\xi} \frac{\partial W}{\partial \xi} + \frac{1}{\xi^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} \right) \\ \gamma_{r\theta} &= -\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{\xi} \frac{\partial W}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

그리고, 무차원화한 면내응력-변형도 관계식 및 면외응력-곡률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_r &= C_{11}\epsilon_r + C_{12}\epsilon_\theta + C_{13}\epsilon_{r\theta} \\ N_\theta &= C_{12}\epsilon_r + C_{22}\epsilon_\theta + C_{23}\epsilon_{r\theta} \\ N_{r\theta} &= C_{13}\epsilon_r + C_{23}\epsilon_\theta + C_{33}\epsilon_{r\theta} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} M_r &= B_{11}\gamma_r + B_{12}\gamma_\theta + B_{13}\gamma_{r\theta} \\ M_\theta &= B_{12}\gamma_r + B_{22}\gamma_\theta + B_{23}\gamma_{r\theta} \\ M_{r\theta} &= B_{13}\gamma_r + B_{23}\gamma_\theta + B_{33}\gamma_{r\theta} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $C_{ij} = K_{ij}/K$, $B_{ij} = D_{ij}/D$ 이다. 비선형 평형방정식은 응력-변형관계식을 대입하여 다음과 같은 무차원화한 평형방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi N_r) + \frac{\partial}{\partial \theta} (N_{r\theta}) - N_\theta &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \theta} (n_\theta) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi N_{r\theta}) + N_{r\theta} &= 0 \\ \frac{4}{\lambda^4} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} (\xi M_r) + \frac{8}{\lambda^4} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} (M_{r\theta}) \right. \\ &+ \left. \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \theta} (M_{r\theta}) \right\} \\ &+ \frac{4}{\lambda^4} \frac{1}{\xi} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (M_\theta) + 2(N_r + N_\theta)\xi \\ &+ \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi N_r \frac{\partial w}{\partial \xi} + N_{r\theta} \frac{\partial w}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial \theta} (N_{r\theta} \frac{\partial w}{\partial \xi} \\ &+ N_\theta \frac{1}{\xi} \frac{\partial w}{\partial \theta}) + 32 \frac{1}{\lambda^2} Q\xi = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, Q 는 q/q_0 이며, q_0 는 기준이 되는 좌굴 하중값으로 $\frac{4}{R^2}\sqrt{KD}$ 이다. 그리고, λ 는 이미 언급한 형상계수로서 $\frac{a}{\sqrt{R^2}}\sqrt[4]{\frac{K}{D}}$ 이다.

3.3 가정변위함수

이 절에서는 Galerkin법에 의하여 해석과정을 정식화함에 앞서 변위함수를 가정한다. 변위함수 W 의 기저함수에 있어서 떡급수의 표현은 여러 가지 생각할 수 있으나, 경선방향의 변위는 원주방향의 변위와 상호관계가 있으므로 이 관계를 모두 만족할 수 가정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 아래 (18)식과 같이 U, V, W 의 변위함수를 가정한다.

$$\begin{aligned} W &= \sum_r \sum_g A_{rg}^w \xi^{r+2g-2} (1-\xi^2)^2 \cos r\theta \\ V &= \sum_r \sum_g A_{rg}^v \xi^{r+2g-1} (1-\xi^2) \sin r\theta \\ U &= \sum_r \sum_g A_{rg}^u \xi^{r+2g-1} (1-\xi^2) \cos r\theta \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, A_{rg} 는 미정계수인 진폭, r 은 원주방향 파수, g 는 경선방향 파수에 관계되며, 이렇게 가정함으로 경선방향 변형의 자유도를 크게 할 수 있어서 수치해석에 의한 결과 값의 정확성을 확보할 수 있었다. 또한 위의 가정은 $\xi=1$ 일 때, 양단고정의 경계조건을 만족한다.

3.4 수치해석과정

Galerkin법에 의해 정식화한 방정식은 하중계수

<표 2> 형상계수(λ)에 따른 좌굴하중

모델	b (mm)	d (mm)	a (mm)	R (mm)	L (mm)	K (kg/mm)	D (kg·mm)	λ	Q	q_0 (g/mm ²)	q_{CP} (g/mm ²)
L-1	3.5	3.3	300	1580	50.31	75.8	68.8	7.73	0.206	0.116	0.024
L-2	3.5	3.3	300	1280	50.47	75.5	68.5	8.59	0.206	0.176	0.036
L-3	3.5	3.3	300	880	51.02	74.7	67.8	10.36	0.200	0.368	0.074
L-4	3.5	3.3	300	680	51.78	73.6	66.8	11.79	0.187	0.607	0.114
L-5	3.5	3.3	300	580	52.55	72.5	65.8	12.76	0.183	0.822	0.150
L-6	3.5	3.3	300	480	54.01	70.6	64.0	14.02	0.177	1.167	0.206

b: 부재단면폭 d: 부재단면높이 a: 셀의 저면반경 R: 곡률반경 L: 대표부재길이 K: 대표축강성(EA/L) D: 대표휨강성(EI/L)
 λ : 형상계수($\frac{a}{\sqrt{R}}\sqrt[4]{\frac{K}{D}}$) Q: 무차원화 좌굴하중(q_{CP}/q_0) q_0 : 기준하중($\frac{4}{R^2}\sqrt{KD}$) q_{cp} : 좌굴하중

Q 를 변수에 포함하고 M 개의 미정계수 A_{rg} 에 관한 연립방정식으로 주어진다. 수식의 구체적인 계산을 실행하기 위하여 미정계수 A_{rg} 의 2개의 첨자 r, g 에 가상미지수 x_i 를 대응시켜 다음과 같은 방정식으로 표현한다.

$$\begin{aligned} L_i(Q, x_i) &= \sum_j \sum_k \sum_l Y3_{ijkl} \cdot x_j \cdot x_k \cdot x_l \\ &+ \sum_j \sum_k Y2_{ijk} \cdot x_j \cdot x_k + \sum_j Y1_{ij} \cdot x_j \\ &+ Y0_i \cdot Q = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

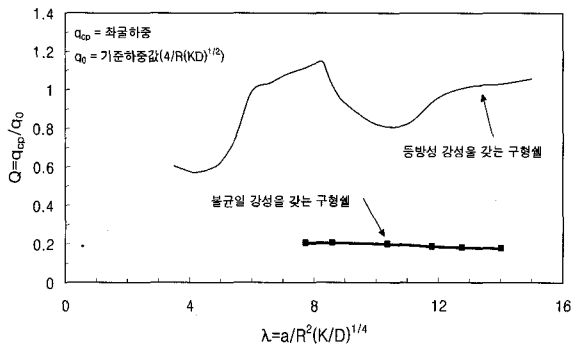
식(19)에서, 하중증분 및 Newton-Raphson법의 반복 과정에 의하여 구속조건을 만족하는 방정식의 해인 미정계수 A_{rg} 및 하중 Q 을 계산한다.

4. 해석결과

4.1. 좌굴하중

<표 2>는 <표 1>에서 보여지는 형상계수(λ)에 따른 해석모델의 좌굴하중을 나타낸다. 표에서 보여지듯이 형상계수에 따른 무차원화 좌굴하중 Q 는 각각 0.206, 0.206, 0.200, 0.187, 0.183과 0.177로 작아지지만, 그 차이는 미소하다.

<표 2>의 무차원화 좌굴하중 Q 을 형상계수에 따라 도식화한 것이 <그림 3>이다. 그림에서 보여지듯이 형상에 매우 민감하게 반응하는 등방성 강성을 갖는 구형셀과 달리 강성분포가 주기성을 갖는 구형셀은 형상계수에 따라 거의 일정한 값을 가



<그림 3> 강성분포가 주기성을 갖는 구형셀의 형상계수에 따른 무차원 좌굴하중

진다. 이는 형상보다는 강성의 주기성이 좌굴하중에 크게 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

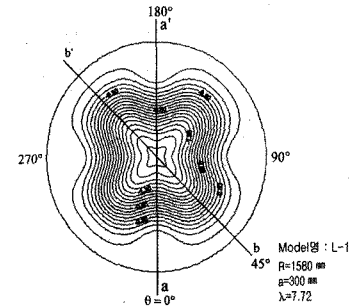
4.2. 좌굴직전 변형분포

<그림 4>~<그림 9>는 면외방향의 변형분포(a) 및 θ 방향이 0° 축(b) 및 45° 축(c)의 좌굴직전 변형모드 즉 좌굴모드를 나타낸다. 그림은 면외방향의 변형분포를 원주방향 θ 로 동일한 변위를 갖는 위치를 연결한 선, 즉 등고선 형식으로 나타내고, 부재 축방향($\theta=0^\circ$)과 부재 축방향에서 45° 일 때의 변형모드를 표시하고 있다.

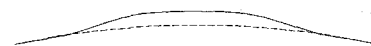
형상계수(λ)가 7.73인 L-1모델의 <그림 4(a)>에서 보여지듯이 돔의 정점이 □□방향의 솟아오르는 원주방향으로 4파의 주기성을 가지는 변형모드를 가지는 것을 알 수 있다. <그림 4(a)>의 a-a' 단면, 즉 θ 방향이 0° 일 때의 변형모드<그림 4(b)>는 ξ 방향에 대해서 돔의 중앙부를 경계로 하여 정점이 상방향이고 경계가 하방향인 돔의 직경에 대해 미소하지만, 1.5파의 모드를 표현하고 있다. 그리고 <그림 4(a)>의 b-b' 단면, 즉 θ 방향이 45° 일 때의 변형모드<그림 4(c)>는 돔의 정점이 상방향이고, 경계부분에서 거의 변형이 발생하지 않고 있다. 이와 같이 θ 가 0° 인 모드와 45° 인 모드의 차이가 있는 것은 면내의 등가강성의 주기성 영향이다.

<그림 5>에서 알 수 있듯이 L-2 모델도, 돔의 정점이 솟아오르는 원주방향으로 4파의 주기성을 가진 변형분포<그림 5(a)>를 나타낸다. 0° 의 변형모드<그림 5(b)>는 돔의 중앙부분을 경계로 하여 정

(a) 변형분포



(b) 변형모드($\theta=0^\circ$)

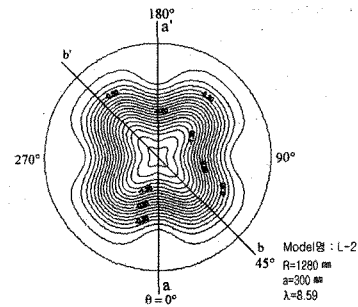


(c) 변형모드($\theta=45^\circ$)



<그림 4> 좌굴직전 변형분포 및 변형모드($\lambda=7.73$)

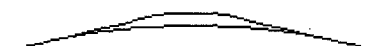
(a) 변형분포



(b) 변형모드($\theta=0^\circ$)

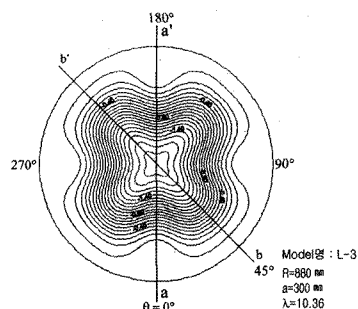


(c) 변형모드($\theta=45^\circ$)



<그림 5> 좌굴직전 변형분포 및 변형모드($\lambda=8.59$)

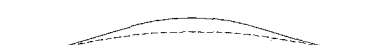
(a) 변형분포



(b) 변형모드($\theta=0^\circ$)



(c) 변형모드($\theta=45^\circ$)



<그림 6> 좌굴직전 변형분포 및 변형모드($\lambda=10.36$)

점은 상방향으로 경계는 하방향으로 돔의 직경에 대해서 1.5파의 모드를 표현하고 있다. 45°의 변형 모드<그림 5(c)>는 돔의 정점은 상방향으로, 경계 부는 거의 변위를 발생시키지 않고 있다. 그 외의 모델에 대한 변형분포 및 변형모드인 <그림 6>~<그림 9> 모두 거의 유사한 결과를 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

따라서, 2방향 그리드(Grid)를 갖는 구형셀에 대한 변형분포는 돔의 정점이 솟아오르는 원주방향에 따라서 4파의 주기를 가지고 있는 것을 보여주고 있으며 참고문헌⁹⁾에서 보여지는 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다.

5. 결론

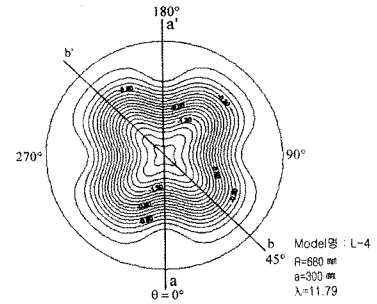
대공간 구조물의 구형지붕 격자형태에 의해 나타나는 지붕강성분포가 주기성을 가지는 구형셀에 대한 거동 및 좌굴특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

형상에 대하여 매우 민감하게 반응하는 등방성 강성을 갖는 구형셀과 달리 2방향 그리드(Grid)를 갖는 격자셀은 곡률반경의 변화에 의한 격자셀의 형상에 관계없이 거의 일정한 무차원 좌굴하중값 Q 와 정점이 솟아오르는 4파의 주기를 갖는 변형분포를 가진다. 이는 형상보다는 강성의 주기성이 격자셀의 좌굴특성에 커다란 영향을 미치고 있다는 것을 나타낸다.

참고 문헌

1. Brush, D. O. and Almroth, B. O., Buckling of Bars, Plates, and Shells, McGraw-Hill, 1975
2. Tillman, S.C., "On the Buckling Behavior of Shallow Spherical Caps under a Uniform Pressure Load", Int. J. Solids and Structures, vol.6, 1970
3. Huang, N. C., "Unsymmetric Buckling of Thin Shallow Spherical Shells", J. Appl. Mech., vol. 31, 1964, pp.447-457
4. Teng, J. G., "Buckling of thin shells:Recent

(a) 변형분포



(b) 변형모드($\theta = 0^\circ$)

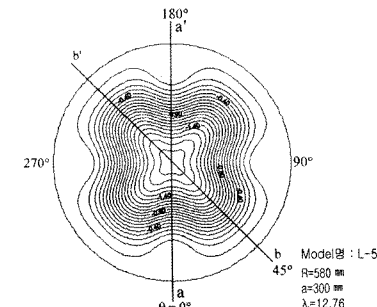


(c) 변형모드($\theta = 45^\circ$)



<그림 7> 좌굴직전 변형분포 및 변형모드($\lambda = 11.79$)

(a) 변형분포



(b) 변형모드($\theta = 0^\circ$)

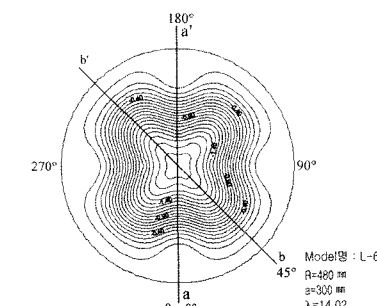


(c) 변형모드($\theta = 45^\circ$)



<그림 8> 좌굴직전 변형분포 및 변형모드($\lambda = 12.76$)

(a) 변형분포



(b) 변형모드($\theta = 0^\circ$)



(c) 변형모드($\theta = 45^\circ$)



<그림 9> 좌굴직전 변형분포 및 변형모드($\lambda = 14.02$)

- advances and trends", Appl. Mech. Rev., vol. 49, no. 4, April 1996, pp.263-274
5. Yamada, M., "An approximation of the buckling analysis of orthogonally stiffened and framed spherical shells under external pressure", Proceedings of the IASS Symposium on Shell and Spatial Structures, Rio de Janeiro, 1984, pp.173-193
 6. 山田大彦, "單層ラチスド-ムの安定解析-その現狀と問題占- 4章. 連續體近似による單層ラチスド-ムの座屈耐力評價について", 日本建築學會シェル空間構造運營委員會, 1989, pp.191-254
 7. 山田大彦, "補剛扁平球殼の外壓による座屈とその近似解析法に關する研究 I", 日本建築學會學術講演梗概集, 昭和54年, pp.943-944
 8. 日置興一郎, スペ-スフレ-ム(立體格子構造)の設計・解析・施工, 昭和57年度文部省科學研究費補助金 總合研究(B) 研究報告書, 1983
 9. 鄭煥穆, 四角形ネットワーク單層ラチスド-ムの座屈特性に關する研究, 東北大學博士學位論文, 1992
 10. 권택진, 셸 구조론, 한국전산구조공학회, 1998
 11. 박상훈, 강성분포가 주기성을 갖는 구형셸의 좌굴해석, 경북대학교박사학위논문, 2002