

역우산형 쌍곡포물선 쉘의 유한요소해석

Finite Element Analysis of Inverted Umbrella-type Hyperbolic Paraboloid Shell

권 홍 주*
Kwon, Hung-Joo

유 은 종**
Yu, Eun-Jong

나 창 순***
Rha, Chang-Soon

요 약

본 논문에서는 유한요소해석법을 사용하여 역우산형 쌍곡포물선셸구조물을 해석하고 그 결과를 기존의 막이론에 의한 설계식의 결과치와 비교하였다. 또한 지붕면의 경사도를 달리하며 경사도에 따른 처짐 및 테두리보와 내부경사리브에 작용하는 부재력, 셸면에 작용하는 막응력의 변화를 살펴보았다. 해석결과 기존의 막응력에 의한 이론해는 테두리보 및 내부경사리브에 대한 부재력을 과대평가하는 반면 막응력에 대해서는 반대로 과소평가를 하고 있는 것으로 나타났다. 유한요소법에 의해 해석한 지붕의 처짐은 경사도가 낮아짐에 따라 급격하게 증가되는 것으로 나타났다.

Abstract

This study presents the comparisons between the analysis results based on membrane theory and finite element analysis for the inverted umbrella-type hyperbolic paraboloid shell structure. The effects of the roof angle on the roof deflections, member forces of edge beams and ribs, and shell stress are also investigated with various roof angles. Results show that the membrane theory overestimates the member forces of edge beams and ribs. On the contrary, the shell stresses are underestimated in the membrane theory when compared to the results from the finite element analysis. The deflections of roof slabs by finite element analysis show drastic increasement as the roof angle decreases.

키워드 : 역우산형셸, 쌍곡포물선셸, 막이론, 유한요소해석

Keywords : Inverted umbrella type shell, Hyperbolic paraboloid shell, Membrane theory, Finite element analysis

1. 서 론

셸구조는 두께가 얇아 단면의 휨 혹은 전단능력 보다는 구조체 전체의 곡률에 의해 외력을 저항하는 형태저항구조로서 이중 직각 방향으로 서로 다른 부호의 곡률을 가지는 이중곡률의 셸구조를 쌍곡포물선셸(Hyperbolic Paraboloid Shell, H.P. Shell 또는 Hypar)이라고 한다. 쌍곡포물선셸의 형식으로는 안장형, 역우산형(inverted umbrella), 내림마루형(gabled vault)등의 종류가 있으며 거동특

성은 형식별로 다르다. 쌍곡포물선셸 구조에 대해서는 1970년대에 이르기까지 막이론(membrane theory)을 적용한 해석 및 이의 확인을 위한 실험이 주를 이루었다. 이후 보다 정밀한 해석을 위한 휨이론(bending theory)의 이론적 연구가 시도되었지만 여러 경계조건에 대해 해석할 수 있는 정도로 진행되지는 못하고 유한차분법 및 유한요소법을 이용한 수치해석으로 진행되었다.¹⁾

국내에서도 안장형이나 내림마루형의 쌍곡포물선셸에 대해서는 휨이론이나 유한요소법을 이용한 해석이 시도되었으나 역우산형 쌍곡포물선셸에 대해서는 막이론에 의한 간략식이 제시되고 있을 뿐이며^{2,4)} 유한요소법 등 별도의 해석 및 연구는 거의 전무한 상태이다.

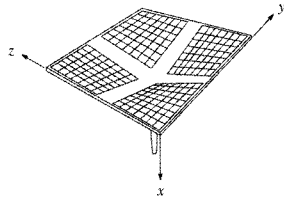
* 한양대학교 건축공학과 석사과정

** 한양대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

*** 교신저자, 국민대학교 건축학과 조교수, 공학박사

Tel: 02-910-4592 Fax:02-942-3110

E-mail : csrha@kookmin.ac.kr

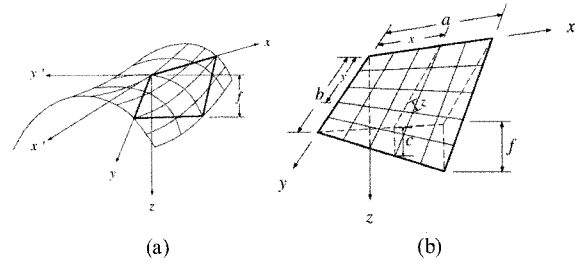


〈그림 1〉 역우산형 쌍곡포물선셸

역우산형 쌍곡포물선셸은 <그림 1>과 같이 그 경계면을 직선으로 처리하고 4개의 H.P. 판넬을 경사면을 따라 연결하여 위로 오목하게 만든 형태의 구조이다. 각 판넬은 외부의 경계면을 따라 테두리보(edge beam)와 내부의 경계면을 따라 경사리브(내부보)로 보강되는데 막이론에 의하면 이들 부재는 셸의 전단응력을 모아서 지점(support)에 전달하는 역할을 한다. 철근콘크리트조 역우산형 쌍곡포물선셸의 설계는 막이론에 근거하여 셸판넬 및 테두리보를 해석하고 허용응력도⁴⁾ 또는 강도설계법⁵⁾을 적용하여 수행한다. 그러나 셸에 작용하는 응력은 막이론에 의한 간략식으로는 정확하게 산정하기 어려운 면이 있고 구조물의 기하학적 형상, 특히 지붕 경사도에 따라서 부재의 응력에 많은 변화가 발생한다. 본 연구에서는 다양한 경사도를 갖는 역우산형 쌍곡포물선셸 지붕에 대해 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 막이론을 바탕으로 하여 콘크리트 구조설계기준⁵⁾에서 제시된 간략식에 의한 결과와의 비교를 통해 설계식의 적절성 여부를 살펴보고 또한 유한요소해석을 통해 얻어진 각 부재에 작용하는 응력 및 역학적 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

2. H.P. 셸의 막응력

<그림 2(a)>와 같이 곡선의 경계면을 갖는 일반적인 쌍곡포물선의 형태는 주곡률선과 평행하게 설정한 좌표계($x'y'z$)에 대하여 다음과 같이 표현된다.



〈그림 2〉 쌍곡포물선셸:
(a) 곡선경계면 (b) 직선경계면

$$z = \frac{y'^2}{2r_{y'}} - \frac{x'^2}{2r_{x'}} \quad (1)$$

여기서 $r_{x'}, r_{y'}$ 는 HP셸의 원점($x' = y' = 0$)에서 곡면의 주곡률반경(principal radii of curvature)을 나타낸다. 한편 <그림 2(b)>와 같이 셸면에서 곡률이 0이 되는 직선모선을 기준으로 한 좌표계(xyz)에 대해서는 좌표간의 비례식을 이용하여 보다 간단한 식으로 표현할 수 있다. 즉,

$$c = \frac{fx}{a} \text{ and } z = \frac{cy}{b} \Rightarrow z = \frac{f}{ab}xy = kxy \quad (2)$$

여기서 a, b, c, f 는 <그림 2(b)>에 나타난 바와 같이 셸면의 좌표를 나타내는 값이다. 또한 k 는 셸면의 뒤틀림을 나타내는 계수로서 $\frac{1}{r_{xy}} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial y}$ 또는 $\frac{1}{r_{yx}} = \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial x}$ 로 구해지는 기울기의 변화량으로 정의한다. 이때의 $r_{xy} = r_{yx}$ 는 뒤틀림에 대한 곡률 반경이다. <그림 1>의 역우산형 HP셸의 경우 경계면이 직선으로 처리되어 있으므로 (2)식의 방법으로 좌표를 정의하는 것이 유리하다.

전통적인 막이론에 의하면 수직방향의 하중에 대해 쌍곡포물선셸은 <그림 3>과 같이 면내전단력으로 지지된다. 즉, <그림 3(a)>에 보여진 메커니즘의 평형방정식은

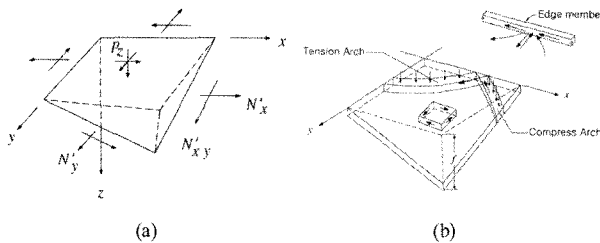
$$\frac{N'_x}{r_x} + \frac{N'_y}{r_y} + \frac{N'_{xy}}{r_{xy}} + \frac{N'_{yx}}{r_{yx}} = p_z \quad (3)$$

여기서 p_z 는 z방향의 하중이다. 이때 x축 및 y축이 직선좌표인 경우는 곡률반경 $r_x = r_y = \infty$ 가 되

고 또한 $N'_{xy} = N'_{yx}$ 이므로 (3)식은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있게 된다.

$$N'_{xy} = \frac{p_z}{2} r_{xy} = \frac{p_z}{2k} \quad (4)$$

한편 발전된 막이론은 <그림 3(b)>에 나타낸 바와 같이 쌍곡포물선면의 하중이 두 교차하는 두 포물선 아치, 즉 압축 및 인장아치에 의해 전달되는 것으로 가정한다⁶⁾. 이에 의하면 셸표면의 하중은 이들 아치 작용을 통해 경계면으로 전달되어 전단력의 형태로 경계면을 구성하는 테두리보(edge beam)에 전달된다. 전달된 전단력은 테두리보에 인장이나 압축의 축력으로 작용하여 최종적으로 지점(support)으로 전달되게 된다.



<그림 3> 쌍곡포물선셸의 막이론:
(a) 막응력 (b) 쌍곡포물선셸의 메커니즘

<그림 1>에 나타낸 역우산 구조의 경우에 막이론에 의해서 외단부의 테두리보에는 인장 축력이 작용하고 경사진 셸과 내부 경사 리브에는 압축 축력이 작용한다. <그림 1>과 같이 각 방향으로 대칭인 역우산 구조의 셸에 등분포의 하중 w 가 작용할 때 테두리보에 작용하는 인장 축력 T_y 는 힘의 평형으로부터

$$T_y = \frac{wa^2b}{2f} \quad (5)$$

와 같이 산정할 수 있다. 또한 경사 리브에 작용하는 압축력은

$$C_y = \frac{wa^2b}{f \cos \theta} \quad (6)$$

로 산정할 수 있으며 이 압축력의 수직 성분은

$$V = C_y \sin \theta = T_y \tan \theta = wab \quad (7)$$

가 된다. 2008년 개정된 철근콘크리트 구조설계기준⁵⁾의 경우 위의 (5)식 및 (6)식의 산정식에 의해 테두리보 및 경사 리브의 부재력을 산정하도록 하고 있으며 셸 부재의 막응력은 테두리보 또는 경사 리브와 셸의 경계면에 작용하는 최대 응력을 기준으로 산정한다. 즉, 경계면에 작용하는 단위 길이당 수평 전단력은

$$N_y = \pm \frac{T_y}{a} = \pm \frac{wab}{2f} \quad (8)$$

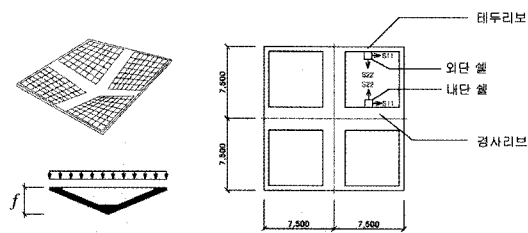
로 산정하고 셸에 작용하는 최대 응력은 단위 길이당 수평 전단력을 셸의 두께로 나누어 산정한다. 기둥 설계용 축력 및 모멘트의 산정은 부재에 비대칭의 적재하중이 작용하는 경우를 고려하여 산정한다.

그러나 철근콘크리트 구조설계기준에서 제시하는 설계식은 막이론에 의한 간략식을 사용하여 주요 부재에 대한 부재력을 제공할 뿐 부재의 실제응력이나 부재의 변형에 대한 구체적인 정보를 제공하지 못하는 단점이 있다. 또한 부재의 강성 및 형상에 의한 응력의 변화에 따라 부재력의 정확성에 서 의문시 되고 있다.

3. 수치해석 예제 및 분석

수치해석에서는 셸구조의 응력 특성을 분석하고 비교하기 위해서 콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집⁵⁾에 예시된 구조물을 사용하였다. 예제 구조물은 <그림 4>에 나타낸 바와 같이 역우산형 H.P. 셸구조로서 지붕크기는 15x15m이며 7.5mx7.5m 크기의 H.P. 셸 4개의 조합으로 구성되었다. 셸의 두께는 75mm이며 지붕의 외각면을 구성하는 테두리보(edge beam)는 200x150mm의 장방형이다. 기둥을 향해 경사진 리브는 경사진 두 셸면 사이의 계곡 부분을 평평하게 만든 폭 1m, 높이

200mm의 역삼각형 형태의 보로 구성되었으며 기둥은 850mm 직경의 원형으로 가정하였다. 고정하중은 셸자중과 등분포 하중으로 환산한 주변보의 자중을 포함하여 1.992 kN/m²이며 적재하중은 1.5 kN/m²로 가정하였다. 예제 구조물의 셸 외각면의 수직치켜올림, 즉 지붕높이 f 는 지붕면의 경사각에 따른 영향을 분석하기 위하여 800mm, 1600mm, 2400mm, 3200mm, 4000mm로 달리하여 그 결과를 비교하였다. 각 타입별 구조물의 형태는 <표 1>에 정리하였다.



<그림 4> 역우산형 쌍곡포물선 셸

<표 1> 해석 모델의 종류

모델	평면 크기 (m)	높이 f (mm)	비율 (f/a)	수평면과의 각도 (degree)
f800	15x15	800	0.1067	6.09
f1600	15x15	1600	0.2133	12.04
f2400	15x15	2400	0.3200	17.74
f3200	15x15	3200	0.4267	23.11
f4000	15x15	4000	0.5333	28.07

3.1 유한요소 모델링

유한요소 해석은 상용 프로그램 SAP 2000⁷⁾을 사용하여 수행하였다. 지붕면을 구성하는 셸부재의 모델링에는 4절점 사변형셸요소 (four-node quadrilateral shell element)를 적용하였으며 테두리보와 리브 부재의 모델링에는 골조요소(frame

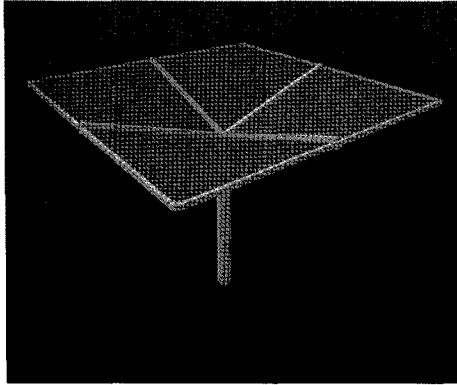
element)를 사용하였다. SAP2000의 경우 쌍곡포물면은 평면치수 및 높이, 그리고 각 방향으로 요소의 수를 입력하면 (2)식에 의한 좌표를 자동으로 계산하여 요소를 생성할 수 있다. 셸요소는 Kirchhoff의 고전적인 얇은판(thin-plate)이론을 사용하여 면의 방향의 전단력을 무시하였다. 따라서 셸요소의 응력은 면내축응력(in-plane direct stress)을 나타내는 S11과 S22, 전단력 S12만이 나타난다.

일반적으로 유한요소의 해석결과는 요소의 크기에 영향을 받기 때문에 적절한 요소의 크기를 선택하기 위해 예제 구조물에 대해 유한요소의 크기를 달리하면서 해석을 수행하였다. <그림 4>에서 셸 외각면의 수직 치켜올림이 2,400mm인 경우에 대해 지붕 슬래브 각 면을 직선모선에 나란하게 각 방향으로 30, 60, 120개로 분할한 경우 즉, 셸요소의 크기를 각각 500x500mm, 250x250mm, 125x125mm로 한 경우 처짐이 가장 큰 지붕 외각 모서리 부분의 사용하중에 대한 처짐을 비교하였다. 이때 셸요소 및 보요소의 탄성계수는 248211 MPa로 동일하게 가정하였다. 각 경우의 처짐은 <표 2>와 같다.

<표 2> 셸유한요소 크기별 지붕모서리 수직처짐

셸 분할 갯수	30 개	60 개	120 개
요소 크기 (mm)	500x500	250x250	125x125
지붕모서리 수직처짐 (mm)	-15.4758	-15.4579	-15.4084
수렴 비율 (이전/현재처짐값)	-	0.9988	0.9968

<표 2>에서와 같이 지붕 모서리 처짐은 요소크기가 작아짐에 따라 약간씩 줄어들기는 하지만 거의 동일한 값을 보인다. 따라서 본 연구에서는 계산 효율성을 고려하여 각 지붕면을 구성하는 셸요소의 크기를 500x500mm인 경우 즉, 각 지붕면을 각 방향으로 30개로 분할하여 모델링하였다. (<그림 5> 참조)

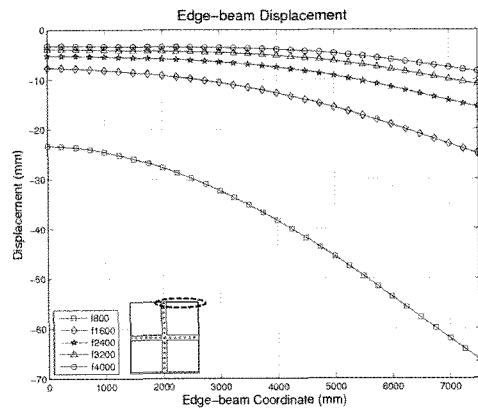


〈그림 5〉 역우산형구조의 유한요소 모델

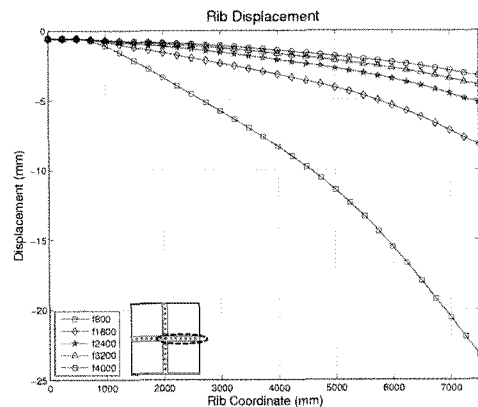
유한요소해석을 통해 <표 1>과 같이 서로 다른 경사도를 가진 경우 변위, 테두리보, 경사리브, 지붕의 셸면에 작용하는 응력의 변화를 분석하였다. 변위의 경우 테두리보와 리브의 처짐 및 지붕면을 형성하는 셸면의 수직처짐을 비교하였으며 테두리보와 내부 경사리브에 대해서는 축력, 셸면에 대해서는 막응력에 해당하는 면내축응력을 서로 비교하였다. 해석에 적용한 하중은 처짐에 대해서는 사용하중, 응력에 대해서는 1.2D+1.6L의 계수하중이다.

3.2 변위

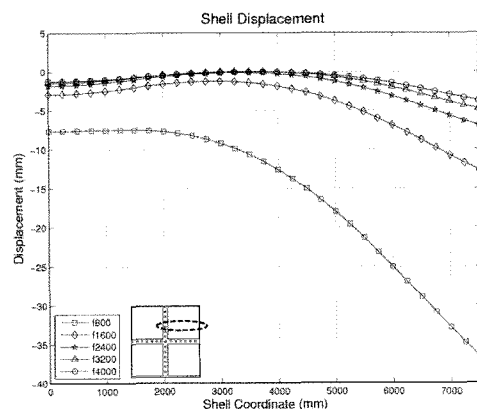
<그림 6>은 각 모델별 테두리보의 처짐을 비교한 것으로 그림에 나타난바와 같이 지붕의 경사도가 낮을수록 처짐값은 커지는 것으로 나타났다. 그림에서 우측 단부는 지붕의 외각모서리에 해당하는 부분으로 지붕전체에서 최대 처짐이 발생하는 곳이다. 또한 <그림 7>은 경사면을 따라 리브의 수직처짐의 변화를 나타낸 것으로 테두리보와 마찬가지로 지붕의 경사도가 낮아질수록 처짐이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 처짐의 증가량도 경사도가 낮아짐에 따라 급격하게 증가되는 것으로 나타났으며 허용처짐을 스패의 1/300로 제한하는 경우 경사도가 6°정도인 모델타입 f800부터는 과도한 처짐에 의해 구조체가 제한받는 것으로 나타났다. <그림 8>은 평면상 테두리보와 기둥사이의 중앙점을 지나는 절단면에서 나타나는 셸의 처짐으로 최대값은 테두리보나 리브와 마찬가지로 외곽부 즉, 테두리보 부분에서 나타나지만 슬래브면 중앙부의 처짐값은 리브부분보다 낮음을 알 수 있다.



〈그림 6〉 테두리보의 처짐



〈그림 7〉 리브의 처짐

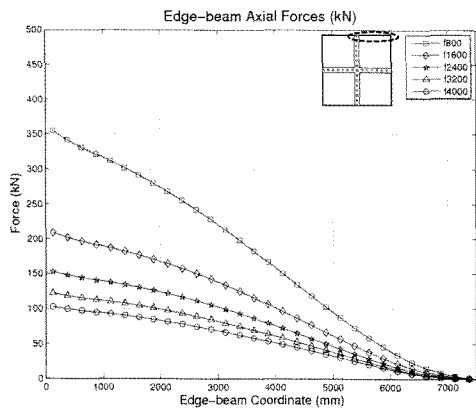


〈그림 8〉 셸면의 처짐

3.3 테두리보의 축력

지붕셸에 작용하는 전단력은 지붕의 외각을 따라 배치된 테두리보에 인장 축력을 발생시킨다. 아래의 <그림 9>는 4개의 판넬로 구성된 지붕면에서 1

사분면을 구성하는 쉘의 가로방향 테두리보(<그림 4> 참조)에 발생하는 축력의 변화를 나타낸 것이다. 가로좌표에서 0에 해당하는 부분이 테두리보의 중앙부, 즉 테두리보와 내부 경사리브가 만나는 교차점으로 여기에서 최대축력이 발생하며 테두리보를 따라 포물선의 형태로 줄어들어 지붕모서리에서는 0이 되는 것으로 나타났다. 지붕면의 경사각이 낮아질수록 테두리보에 작용하는 축력은 커지며 증가되는 비율도 점차 커지는 것을 알 수 있다.



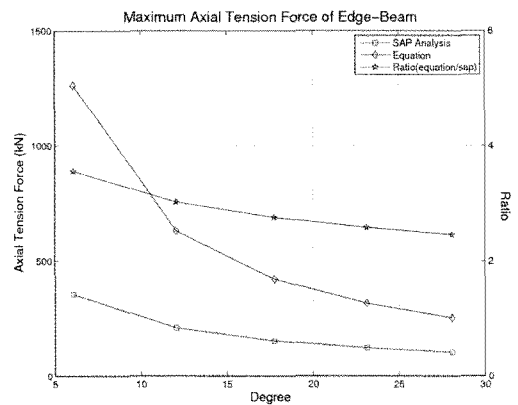
※ '0' 부분이 테두리보의 중앙부, '7500' 부분이 모서리 임.

<그림 9> 테두리보에 작용하는 인장 축력 분포

한편 전통적인 막이론에 의해서는 (5)식에 제시한 근사값으로 테두리보 중앙부에서의 최대축력을 구할 수가 있으며 이 값은 테두리보를 따라 직선으로 변화하는 것으로 가정한다. 유한요소해석에 의한 테두리보의 최대축력과 구조설계기준에서 제안하는 (5)식에 의한 테두리보의 최대축력을 경사도 별로 정리하여 <표 3>에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 규준에서 제시하는 간략식은 유한요소해석에 의한 결과에 비해 테두리보의 축력을 지나치게 과대평가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 지붕 경사도가 낮을수록 더 강하여 800mm의 지붕 높이에 대해서는 거의 3.5배 이상의 과대한 축력이 산정되는 것으로 나타났다. <그림 10>은 <표 3>에 제시된 지붕의 경사도에 따른 테두리보의 최대축력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 테두리보의 최대축력은 지붕경사도가 커짐에 따라 줄어들며 특히 간략식에 의한 변화가 더 큰 것을 알 수 있다.

<표 3> 테두리보에 작용하는 인장축력 (단위: kN)

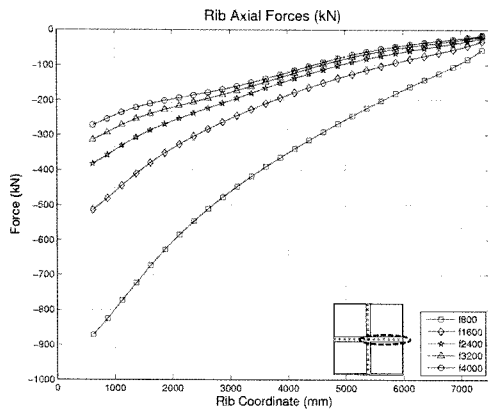
타입	유한요소 해석 ⁽¹⁾	규준식 (5)식 ⁽²⁾	비율 (2) / (1)
f800	355.0	1263.0	3.56
f1600	208.8	631.5	3.02
f2400	152.7	421.0	2.76
f3200	122.2	315.7	2.58
f4000	102.8	252.6	2.46



<그림 10> 지붕 경사도에 따른 테두리보 최대축력의 변화

3.4 내부 경사리브의 축력

내부의 경사리브에는 압축력이 작용한다. 최대축력은 기둥과의 교차점에서 발생하며 <그림 11>에 나타낸 바와 같이 리브를 따라 포물선의 형태로 변화하는 것으로 나타났다. <그림 11>은 지붕면중 1사분면을 구성하는 쉘의 아랫 쪽 경계면을 구성하는 가로방향 리브의 축력을 나타내며 축력은 기둥과 접하는 지점(support)의 constraint에 의해 500mm 떨어진 점에서의 축력을 최대 축력으로 산정하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 리브에 작용하는 최대 압축 축력도 테두리보의 인장축력과 동일한 양상으로 지붕의 경사도가 낮아질수록 증대하는 것으로 나타났다.



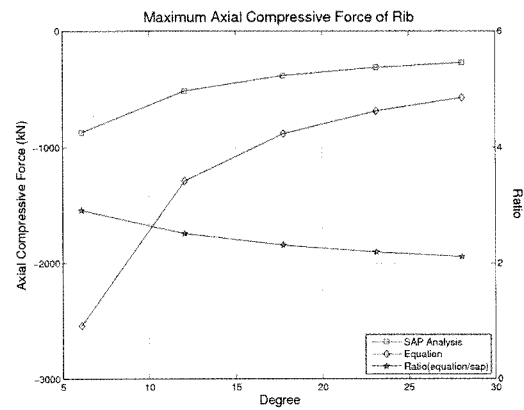
※ '0' 부분이 테두리보의 중앙부, '7500' 부분이 모서리 임.

〈그림 11〉 내부 경사리브에 작용하는 압축력 분포

막이론에 의한 근사값은 (6)식에 의해 산정하였으며 지붕의 경사도별로 유한요소법에 의한 결과와 비교하여 <표 4>에 정리하였다. 유한요소해석에 의한 결과와 비교하면 규준식이 경사리브의 축력을 2-3배 정도 과대평가하는 것으로 나타났으며 경사도가 낮을수록 과대평가하는 비율은 커지는 것으로 나타났다. <그림 12>는 <표 4>에 제시된 지붕의 경사도에 따른 리브의 최대축력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 리브의 최대축력은 지붕경사도가 커짐에 따라 줄어들며 특히 약산식에 의한 변화가 더 큰 것을 알 수 있다.

〈표 4〉 리브에 작용하는 최대 압축 축력 (단위: kN)

타입	유한요소 해석 ⁽¹⁾	규준식 (5)식 ⁽²⁾	비율 (2) / (1)
f800	-871.2	-2541.1	2.92
f1600	-513.9	-1291.8	2.51
f2400	-382.7	-884.3	2.31
f3200	-313.5	-686.8	2.19
f4000	-271.4	-572.7	2.11



〈그림 12〉 경사도에 따른 경사리브 최대축력의 변화

3.5 쉘의 막응력

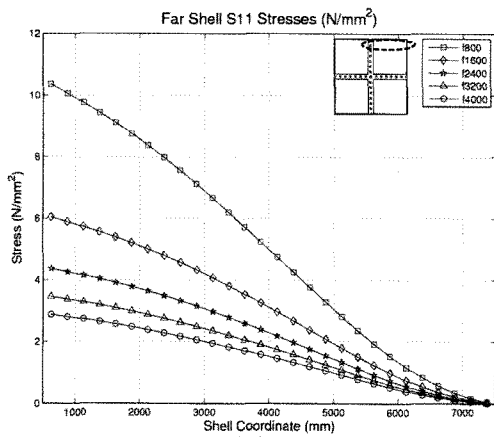
지붕면을 구성하는 쉘의 막응력은 테두리보 혹은 경사리브와 쉘의 경계면에 최대이다. 막응력은 인장 또는 압축력을 쉘의 단면적으로 나누어서 단위 면적당 작용하는 응력으로 환산하였다. <그림 13>은 유한요소해석에 의한 막응력을 1사분면에 해당하는 쉘의 위쪽 테두리보와 접하는 쉘요소(외단)의 응력과 아랫쪽 경사리브와 접하는 쉘요소(내단)의 응력을 가로방향성분(S11)과 세로방향성분(S22)으로 나누어 나타낸 것이다 (<그림 4> 참조). 외단 쉘요소의 응력은 위쪽 테두리보에 접하는 쉘요소의 값을 취하였으나 내단 쉘요소의 응력은 유한요소해석시 경사리브와의 접합면에서의 응력집중현상을 고려하여 경사리브중심에서 500mm 떨어진 지점의 응력을 비교하였다.

한편 규준식에서 제시하는 막응력은 (8)식에서 산출된 힘을 쉘단면적으로 나눈 것으로 가로방향과 세로방향에 대해 같은 값을 갖는다. 유한요소해석에 의해 산정한 막응력과 규준식에서 제시하는 막응력은 <표 5>에 비교하여 정리하였다.

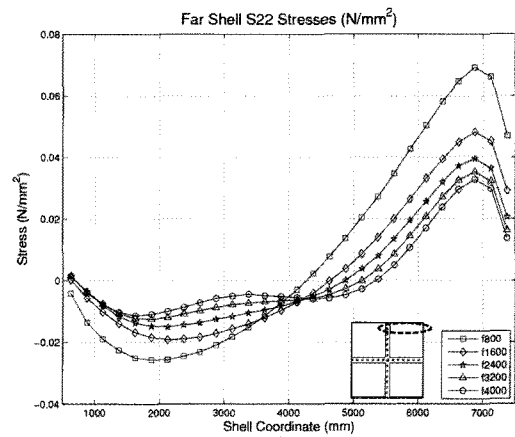
규준식에서 제시하는 막응력은 유한요소해석에 의한 막응력에 비해 지나치게 과소평가되는 경향을 갖는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 쉘의 외단보다는 내단에서 더 큰 것으로 나타났다.

〈표 5〉 셸에 작용하는 막응력 (단위: N/mm²)

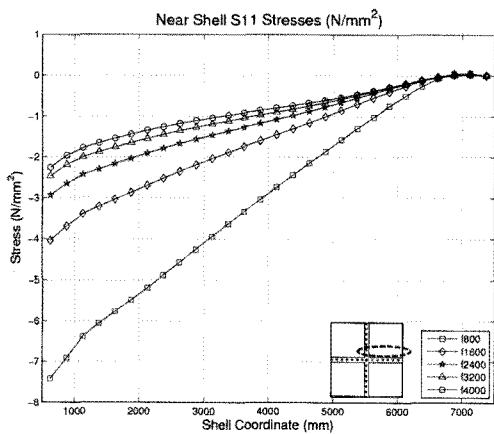
타입	유한요소해석		규준식 ⁽³⁾	비율 (1) / (3) 외단 내단	비율 (2) / (3) 외단 내단
	최대 S11 ⁽¹⁾ 외단 내단	최대 S22 ⁽²⁾ 외단 내단			
f800	10.366 -7.428	0.069 10.366	±2.25	4.62 3.31	0.03 4.62
f1600	6.042 -4.045	0.048 6.043	±1.12	5.38 3.60	0.04 5.38
f2400	4.368 -2.938	0.039 4.369	±0.75	5.84 3.92	0.05 5.84
f3200	3.458 -2.467	0.035 3.458	±0.56	6.16 4.39	0.063 6.16
f4000	2.875 -2.263	0.033 2.876	±0.45	6.40 5.04	0.07 6.40



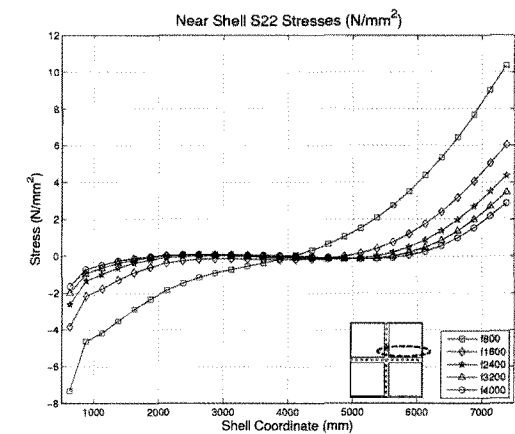
(a)



(b)



(c)



(d)

※ '0' 부분이 테두리보의 중앙부, '7500' 부분이 모서리 임.

〈그림 13〉 셸응력의 분포 : (a) 외단부 가로방향 응력, (b) 외단부 세로방향 응력, (c) 내단부 가로방향 응력, (d) 내단부 세로방향 응력

4. 결 론

본 연구에서는 역우산형 형태의 쌍곡포물선셸 구조의 거동을 유한요소해석법으로 분석하여 현재 콘크리트설계기준에서 제시하고 있는 막이론에 근거한 부재력 산정 방법과 비교하였다. 유한요소는 지붕면을 구성하는 슬래브는 얇은셸 요소를 이용하고 테두리보와 경사리브는 골조요소를 이용하였다. 또한 지붕의 경사도를 달리하면서 각 부재에 작용하는 변위 및 응력의 변화를 상호 비교하였다. 이상의 결과에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 유한요소해석에 의한 결과를 기준으로 전통적인 막이론에 의한 간략식은 테두리보 및 내부의 경사리브의 축력을 과대평가하는 것으로 나타났으며 특히 지붕의 경사도가 낮은 경우 이러한 경향은 더 큰 것으로 나타났다. 인장축력을 받는 테두리보의 경우 막이론에 의한 간략식은 유한요소 해석에 비해 경사도에 따라 2.5-3.5배 정도의 큰 축력을 제공하고 있으며 압축 축력을 받는 경사리브의 경우는 2-3배 정도의 큰 축력을 제공하고 있다.

둘째, 유한요소해석에 의한 결과에 비해 간략식은 셸면의 막응력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 셸면의 응력은 위치에 따라 달라지는데 테두리보 및 경사리브와 접하는 부재에서 최대값을 가지며 인장 및 압축에 대해 공히 1/4-1/6 정도로 응력을 과소평가하는 것으로 조사되었다.

본 연구의 결과를 통하여 볼 때 역우산형의 쌍곡포물선 셸구조는 막이론에 의한 간략식과 유한요소 해석에 의한 정밀해석에서 비교적 큰 차이가 발생함을 알 수 있었으며 따라서 이와 같은 구조물의 해석 및 설계에는 간략식보다는 정밀한 유한요소 해석을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 부득이 간략식을 적용하는 경우에는 지붕 슬래브를 구성하는 셸면의 응력이 과소평가되는 점을 고려하여 상당량의 안전율을 확보하도록 주의할 기울여야 할 필요가 있다.

- 참고문헌 -

1. Billington D.P.(1982), Thin Shell Concrete Structures, McGraw-Hill Book Company, 2nd Ed.
2. 강주원, 서삼열, 권택진(1989), 안장형 H.P 셸의 휨이론에 의한 응력해석, 대한건축학회학술발표논문집, 9(1), pp.417~422
3. 박성수, 성재표 (1993), 복합 H.P. SHELL의 유한요소해석, 대한건축학회논문집, 9(8), pp.183~191.
4. 대한건축학회(1998), 철근콘크리트구조, 기문당
5. 대한건축학회(2008), 콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집
6. Parme, A.L.(1958), Shells of Double Curvature, ASCE, Vol. 123
7. CSI(2005), CSI Analysis Reference Manual

▶접수일자 : 2010년 12월 2일

▶심사 완료일자 : 2010년 12월 30일

▶게재 확정일자 : 2011년 2월 16일