지점변형을 하는 모임지붕형 쌍곡포물선셸의 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Gabled Hyperbolic Paraboloid Shells Subjected to Support Movements

김 승 남* 유 은 종** 나 창 순***
Kim, Seung-Nam Yu, Eun-Jong Rha, Chang-Soon

Abstract

This study investigated the behaviors of the gabled hyperbolic paraboloid shell structure subjected to differential settlement and the horizontal displacement due to the elongation of tie rod/beam on supports. Two types of shell structure with different roof slopes are used in study; conventional type which has perimeter beams around the shell panel, and simple type which removes the edge beams along the slab edge line. The effect of the removal of edge beam under vertical or horizontal displacement on supports, and the roof slope was compared using the finite element analysis.

Keywords : Gabled shell, Hyperbolic paraboloid shell, Finite element analysis, Support Movement

1. 서 론

대표적인 쌍곡포물선셸의 하나인 모임지붕형 쌍곡포물선셸(gabled or hipped hyperbolic paraboloid shell)은 4개의 쌍곡포물선셸을 수평면을 따라서 결합시킨 형태의 구조이다. 이와같은 모임지붕형 쌍곡포물선셸은 4개의 셸과 4개의 기둥으로 구성된 단일 구조로 이루어지기도 하고^{1,2)} 경우에 따라 이러한 단일구조를 종횡으로 연속으로 연결하여 군집형태의 복합구조로 구성되기도 한다³⁾. 단일구조로 형성되는 모임지붕형 쌍곡포물선셸의 경우는 지붕구조의 응력은 지점의 지지조건에 따라 크게 달라진다. 단일 모임지붕형 쌍곡포물선셸의 네 모서리 지점, 즉 기둥의 변위는 과도한 변형이 발생하지 않도록 타이로드 또는 연결보 등으로 기둥을 연결하여 기둥의 변형을 제

어할 수 있는 적절한 구조가 필요하다 <Fig. 1>. 한편 전통적인 해석법인 막이론에 의하면 쌍곡포물선셸의 외곽 테두리는 보로 이루어지며 이들 외곽 테두리보를 통하여 셸의 응력은 면내전단력의 형태로 지점으로 전달되게 된다. 셸의 경계면을 형성하는 이들 테두리보는 셸의 경사면을 따라 형성된 모서리보(edge beam)와 모서리보의 꼭지점들을 수평으로 연결하는 중앙보(ridge beam or crown beam)로 구분된다 <Fig. 1>. 셸면은 테두리보와 나란한 방향으로서는 직선을 형성하지만 45° 방향과 그 직각 방향으로서는 볼록하거나 오목한 포물선의 형상을 가진다. 막이론에 의하면 등분포하중을 받는 경우 셸의 응력은 볼록하거나 오목한 형태의 포물선을 따라 각각 압축력과 인장력으로 분해되어 테두리보 및 중앙보로 전달된다 <Fig. 2>.

한편 유한요소법을 이용한 보다 정밀한 해석에 의하면 셸응력은 막이론과는 달리 셸면에 작용하는 하중은 셸꼭지점(crown)에서 지점으로 향하는 대각선방향으로의 아치작용(arch action)에 의해 압축력으로 주로 전달되며 그것과 직교하는 방향으로의 인장력은 상대적으로 미미한 것으로 나타난다³⁻⁴⁾. 유한요소해석에 의하면 응력이 셸을 통해 지점으로 직접 전달되므로 테두리보의 응력은

* 한양대학교 건축공학과 박사과정
Hanyang University, Dept. of Architectural Eng.
** 한양대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
Hanyang University, Dept. of Architectural Eng.
*** 교신저자, 국민대학교 건축학과 부교수, 공학박사
Kookmin University, Dept. of Architecture
Tel: 02-910-4592 Fax: 02-910-3110
E-mail : csrha@kookmin.ac.kr

작아지는 반면 지점 근처의 셸에는 매우 높은 압축응력이 나타나게 된다.

〈Fig. 1〉 Gabled Hyperbolic Paraboloid Shell

〈Fig. 2〉 Shell Behavior by Membrane Theory

이와 같은 결과에 근거하여 Jadik and Billington⁵⁾은 지붕 경사면을 형성하는 모서리보를 제거한 보다 날렵한 형태의 모임지붕형 셸을 제시하였다. 그러나 여기에서는 지점(supports)의 이동이 고정된 상태를 가정하였으며 따라서 지점의 수직 또는 수평변형이 발생하는 일반적인 경우에 대한 검토는 누락되었다. 따라서 본 연구에서는 동일한 구조 형태에 대해 지점의 부등침하 및 수평이동을 인위적으로 부여함으로써 지점의 변형이 구조물에 주는 영향을 종합적으로 분석하고 그 결과를 비교하고자 하였다. 재료는 탄성범위로 한정하였으며 지점의 변형은 부등침하에 대한 영향을 평가하기 위하여 한 지점에 경간의 1/500에 해당하는 부등침하를 가정하여 수직변위를 부여하고 해석하였다. 또한 지점의 수평변형을 고려하기 위해서는 지점들을 서로 연결하는 타이로드를 설치하고 타이로드의 직경을 달리하면서

해석하였다. 지붕의 경사도에 의한 영향도 고려하기 위해 지붕의 경사도를 달리하여 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 서로 비교하였다.

2. 해석 모델

2.1 모임지붕형 셸의 해석에 관한 기존연구

전통적인 막이론에서는 셸의 직선 경계면이 테두리보로 둘러싸이고 오목하고 볼록한 셸의 곡선을 따라 인장 또는 압축의 아치작용을 통해 셸의 하중을 전달한다⁶⁾. 한편 기존의 유한요소해석에 의한 거동연구에 의하면 직선 경계면을 형성하는 테두리보가 안쪽으로 변형함으로써 인장아치의 작용은 사라지고 대부분의 하중이 지붕의 꼭지점과 지점을 가로지르는 대각선 방향의 압축아치 작용에 의해 직접 전달하게 된다³⁻⁴⁾. 이와 같은 응력의 전달 메커니즘은 인장아치 작용으로 전달되는 셸의 응력을 지지하는 모서리보의 역할에 대해 의구심을 갖게 하였으며 Jadik and Billington⁵⁾의 연구에서는 Shaaban and Ketchum³⁾의 연구에서 사용한 모델에서 경사진 모서리보를 제거함으로써 셸의 하중을 대각선 방향의 압축아치를 통해 지점으로 직접 전달하도록 하였다. 대각선 방향의 압축아치를 통해 전달되는 압축력은 지점부분의 셸에 높은 압축응력을 유발하기 때문에 Jadik and Billington⁵⁾은 지점부분의 셸의 두께를 증대시켜 셸의 압축응력을 감소시키는 방법을 제안하였다.

Jadik and Billington³⁾의 연구에서는 Shaaban and Ketchum³⁾의 연구에서 사용한 모델과 동일한 재료와 규모를 적용하되 중앙보의 크기를 일부 변단면으로 변경하였다. 또한 Shaaban and Ketchum³⁾의 모델에서 사용한 모서리보를 제거하는 대신 기둥에 가까운 코너부분의 셸의 두께를 3in.(75mm)에서 8in.(200mm)까지 증가시켰다. Jadik and Billington⁵⁾의 연구에 의하면 모서리보가 없는 경우 중앙보 및 셸 단부의 처짐은 모서리보가 있는 경우에 비해 증가하지만 허용범위 이내로서 문제가 되지 않는 것으로 나타났다. 또한 중앙보의 축력도 막이론에 의한 값에 비해 훨씬 작게 산출되었으며 모서리보를 제거한 셸단부에서의 축력의 크기도 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 모서리보를 제거함으로써 감소된 자중의 영향과 함께 대각선 방향으로의 압축아치

작용으로 인하여 셸하중이 대부분 지점으로 직접 전달되기 때문에 분석하고 있다. 다만 셸에 작용하는 압축응력은 모퉁이의 지점 근처에서 급격하게 증가하므로 셸의 두께를 증가시켜 응력의 크기를 조절하여 허용응력 이내가 되도록 제한하였다.

김승남 등⁷⁾의 연구에서는 Jadik and Billington⁵⁾의 연구에서 사용한 동일한 모델을 적용하여 조건을 달리하여 분석하였다. 즉, 동일한 셸구조에서 경사도에 따른 영향을 분석하기 위해 지붕 꼭지점의 높이를 고정하지 않고 1.2m에서 6.0m로 변화시키며 셸구조의 각 부분의 영향을 비교하였다. 김승남 등⁷⁾의 연구에 의하면 경사도가 낮아질수록 셸의 응력이 증가하고 모서리보를 제거하는 경우에는 셸의 처짐이 증가하는 것으로 나타났다.

2.2 해석 모델

본 연구에서는 기존 연구결과와의 비교를 위해 기존의 연구^{3,5,7)}에 사용된 것과 동일한 구조를 적용하기로 한다 <Fig. 3>. 셸구조물은 수평투영면적이 24m×24m의 셸구조로서 12m×12m 크기의 판넬 4개를 연결하여 구성되며 셸의 두께는 75mm로 가정하였다. 지붕의 경사도에 따른 영향을 비교하기 위하여 지붕의 꼭지점 높이는 2.4m(지붕경사도 1/5) 및 4.8m(지붕경사도 2/5)로 구분하였다. 중앙보는 폭 600mm, 두께는 셸의 두께를 포함하여 200mm로 가정하였으며 경사방향의 모서리보는 300mm×400mm의 크기로 가정하였다 <Table 1 참조>.

<Table 1> Member Size of Gabled HP Shell Model

Components	Sizes
Shell	24m×24m (80ft×80ft)
Thickness	75mm (3 in.)
Ridge Beam	600mm×200mm (24in.×16in.)
Edge Beam	300mm×400mm (12in.×16in.)
Height(Slope)	2.4m (1/5) / 4.8m (2/5)

모서리보를 제거한 경우에는 기존의 연구^{5,7)}와 같이 지점 근처의 셸의 두께를 증가시켜 대각선 방향의 압축아치 작용에 의해 증가한 셸의 압축응력을 감당하도록 하였다 <Fig. 4>. 그림의 숫자는 해당 셸요소의 두께(단위-in.)를 나타내며 지점

(supports)은 응력집중을 피하기 위해 그림에서 점으로 표시된 바와 같이 10개 절점으로 분산하였다. 모델링 및 해석은 유한요소 해석 프로그램 SAP2000⁸⁾을 사용하였다. 셸은 Kirchhoff의 고전적인 얇은판(thin-plate)이론을 사용한 4절점 사변형 셸요소(four-node quadrilateral shell element)를 사용하여 면외방향의 전단력은 무시하고 셸요소의 응력을 면내축응력(in-plane direct stress)과 면내전단력만을 고려하였다. 각각의 셸판넬은 양 방향으로 40개의 그리드로 분할하여 그리드 간격을 0.3m로 유지하였다. 중앙보의 모델링은 중앙보는 보요소(frame element)로 모델링하거나¹⁻²⁾ 또는 셸요소(shell element)로 모델링하고 있다^{5,7)}. 본 연구에서는 김승남 등⁷⁾의 연구 결과를 참조하여 셸에 대한 중앙보의 상대적인 위치를 정확하게 모델링할 수 있는 Layered shell 요소를 이용하여 여러 층의 셸로 분할하는 모델링기법을 적용하였다. 테두리 보의 모델링에는 보요소(frame element)를 사용하였다.

<Fig. 3> Geometry of Gabled HP Shell Model

<Fig. 4> Thickness of Shell Corner

2.3 지점의 변형

본 연구에서는 지점의 변위 발생에 따른 모임지붕형 셸구조의 거동 특성을 파악하기 위하여 한 지점에 수직변위와 수평변위가 발생하도록 하였다. 수직 변위는 구조물의 부등침하를 고려하기 위한 것으로 기준⁹⁾에서 허용하는 최대 부등침하량으로 경간의 1/500을 가정하여 <Fig. 5>의 우측 상단 지점에 수직으로 50mm의 처짐을 직접 부여하였다. 한편 수평변위에 대해서는 <Fig. 1>의 타이로드의 크기로 조정하였는데 기존의 연구⁴⁾와의 비교를 위해 타이로드의 직경을 2.1 in.(53mm)와 3 in.(76mm)로 구분하여 모델링하고 변형의 대소에 따른 구조물의 거동을 비교하였다. 타이로드는 트러스 요소로 모델링하였으며 재료상수로서 탄성계수는 29,000ksi (200 GPa)의 값을 적용하였다. 지점의 모델링은 <Fig. 5>에 표기한 바와 같이 변형이 허용된 우측 상단의 지점은 양방향 이동단으로, 좌측 하단 지점은 각 방향에 대해 이동이 구속된 회전단으로 구성하였으며 나머지 지점은 한 방향으로만 이동이 가능하도록 하였다. 기둥은 모델링에서 별도로 고려하지 않았다.

<Fig. 5> Supports Modeling

3. 유한요소해석결과

본 장에서는 지점의 변형에 따른 각 부재의 영향을 평가하여 분석하였다. 지점의 변형은 수직과 수평에 대해 공히 우측 상단의 모서리 지점에 발생하는 것으로 모델링하였다 <Fig. 5>. 부재의 영향은 중앙보 및 모서리보, 그리고 셸의 응력에 대해 각각 평가하였다. <Fig. 6 (a)>은 모서리보 및 중앙보의 위치를 나타내는 것으로 1번 위치로 표시된 부재는 변위가 발생한 지점을 포함하는 모

서리보를 나타내고 2번 위치는 변위가 발생한 지점에서 먼 쪽의 모서리보의 위치를 나타낸다. 모서리보를 제거한 경우의 1번 또는 2번 부재는 모서리보가 제거된 셸의 끝단을 나타낸다. 또한 3번 위치로 표시된 부재는 중앙보의 위치를 나타내며 부재는 평행하다. 한편 셸의 응력은 대각선 방향의 주응력을 비교하였으며 변위가 발생한 지점을 포함하는 대각선 방향 (<Fig. 6(b)>의 1,3분면을 지나는 1번 방향)과 이 지점에 대해 직각 방향 (<Fig. 6(b)>의 2,4분면을 지나는 2번 방향)에 대해 각각 검토하였다. 또한 각각의 셸 판넬에 대하여 표시된 1, 2번 대각선 방향과 직각 방향의 셸 응력에 대해서도 검토하였다.

<Fig. 6> Numbering for Roof Shells

<Fig. 7 - Fig. 16>의 그래프는 지점 변형에 대한 구조물의 거동과 응력을 나타낸 것으로 지점 변형이 발생한 경우에 대해 지점의 변형이 없는 경우와 비교하여 값을 나타내었다. 또한 모서리보를 제거한 경우에 대해 구조물의 거동변화를 분석하기 위해서 모서리보가 있을 때(실선으로 표시된 값)의 결과와 모서리보를 제거한 경우의 결과(점선으로 표시된 값)를 동시에 나타내었다.

3.1 지점의 부등침하에 의한 영향

<Fig. 7>은 우측 상단 모서리 지점에서 부등침하가 없는 경우에 대한 처짐에 대해 부등침하

(50mm)가 발생한 경우의 셀의 모서리면 및 중앙보의 처짐을 비교하여 나타낸 그래프이다. <Fig. 7(a)>는 지붕 꼭지점의 높이가 2.4m인 경우이며 <Fig. 7(b)>는 4.8m인 경우이다. 처짐이 발생한 지점을 포함하는 1번 모서리보 부분을 살펴보면 (<Fig. 7> 상단) 모서리보가 없는 경우가 모서리보가 있는 경우에 비해 처짐의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있으며 지붕의 경사도가 낮을수록 그러한 경향은 더욱 큰 것을 알 수 있다. 다만 허용 처짐량을 스패의 1/300으로 하였을 때, 어느 경우에도 허용처짐량을 초과하지는 않는 것으로 나타났다. 수직 처짐이 발생한 지점의 반대편 2번 모서리보의 경우(<Fig. 7> 중단), 가운데 꼭지점을 중심으로 꼭지점의 좌측은 부등침하가 발생하지 않은 경우에 비해 많은 처짐이 발생하지만 오

히려 우측은 1번 모서리보의 영향으로 부등침하가 발생하지 않은 경우에 비해 상승하는 것을 알 수 있다. 모서리보가 없는 경우에 그리고 지붕의 경사도가 낮은 경우에 이러한 현상은 두드러지는 것으로 나타났다. <Fig. 7>의 하단 그래프는 중앙보의 처짐을 나타내는 그래프이다 (<Fig. 6(a)>에서 3번 위치). 그래프의 중앙이 셀의 정점에 해당하며 우측이 1번 모서리보와의 교차점에 해당한다. 부등침하에 의해 1번 모서리보 중앙부 꼭지점에는 수직변형이 발생하며 이 절점의 수직 방위 이동에 의해 중앙보의 우측 단부에 수직 처짐이 발생한다. 이로 인한 중앙보의 변형은 보의 길이에 걸쳐 거의 직선적으로 발생하며 변형량은 모서리보의 유무와 지붕의 경사도에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

<Fig. 7> Deflections

<Fig. 8>은 부등침하가 발생한 경우의 부재 축력의 변화를 나타낸다. 상단 및 중단의 그림에 나타난 1번, 2번 모서리보의 축력은 지점침하에 의해 큰 영향을 받지 않으며 오히려 지붕의 높이에 의한 경사도에 더 크게 영향을 받는 것을 보여준다. 모서리보를 제거한 경우의 축력은 점선으로 표시

된 바와 같이 축력의 절대 크기가 미미해지는 것을 알 수 있다. 그러나 <Fig. 8> 하단에 나타난 바와 같이 중앙보의 경우에는 부등침하에 따라 중앙부의 인장축력이 다소 증가하는 것을 알 수 있으며 모서리보가 없는 경우 중앙보에 작용하는 축력은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 증가는

지붕의 경사도가 높아진 경우에도 유사하다. 다만 축력의 절대 크기 자체는 미미하여 부등침하 및

모서리보의 유무, 그리고 지붕의 경사도에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

<Fig. 8> Axial Forces

<Fig. 9>는 부등침하가 발생한 경우의 휨모멘트 변화를 나타낸다. 부등침하에 의해 모서리보의 중앙부에는 정모멘트의 증감이 발생하는데 1번 모서리보의 경우(<Fig. 9> 상단)에는 침하가 발생하는 쪽은 증가, 반대편의 중앙부에는 모멘트가 감소하는 것을 알 수 있다. 2번 모서리보의 경우에는 우단에 연결된 1번 모서리보의 영향으로 반대 방향으로 모멘트의 증감이 발생한다. 모멘트의 크기는 지붕의 경사도에 크게 관계없이 얻어진다. 모서리보가 제거된 모델에서는 셸 부재의 강성이 미미하므로 휨모멘트 값도 무시할 정도이다. 한편 중앙보의 경우에는 모서리보의 유무, 부등침하의 유무, 그리고 지붕의 경사도에 따라 모멘트의 크기가 다소 변동하지만 그 값 자체는 상대적으로 미미하여 변화에 따른 큰 의미를 찾기 어렵다고 할 수 있다.

<Fig. 10> 및 <Fig. 11>은 부등침하가 발생한 경우의 셸응력 변화를 나타낸 것이다. <Fig. 10>의 상단 및 하단 그림은 부등침하가 발생한 지점을

연결하는 1번 대각선 방향 및 직각 방향의 2번 대각선 방향의 셸 주응력을 나타낸 것이다. 1번 대각선 방향의 셸응력은 부등침하에 의해 중앙부 꼭지점에서 응력이 증가하지만 단부의 경우는 응력의 큰 변화가 나타나지 않는 것을 나타낸다. 이는 모서리보가 있는 경우와 없는 경우 동일하게 발생하는 현상이며 지붕의 경사도가 커질 때 중앙부에서의 변화는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 직각 방향의 2번 대각선 방향 셸응력의 변화 또한 단부보다는 중앙부에서의 변화가 두드러지며 변화율은 지붕의 높이가 높은 경우에 더욱 큰 것을 나타낸다. <Fig. 11>은 대각선 아치방향에 직각의 인장아치(<Fig. 2> 참조)의 셸응력을 나타낸 것으로 모서리보가 없는 경우에, 그리고 지붕의 높이가 낮은 경우 셸의 인장응력이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 대각선방향의 압축아치에 비해 인장아치의 셸응력은 부등침하에 의한 영향이 적으며 지붕의 경사도에 의해서도 변화량은 크지 않은 것으로 나타났다.

〈Fig. 9〉 Bending Moments

〈Fig. 10〉 Shell Stress along Diagonal

〈Fig. 11〉 Shell Stress

3.2 지점의 수평이동에 의한 영향

기둥과 지붕첼로 구성된 모임지붕형 쌍곡포물선 첼구조는 지붕의 하중에 의해 기둥이 수평으로 변형을 함으로써 각 지점에는 수평으로 변위가 발생한다. 이와 같은 수평방향의 지점 변형은 지붕첼 및 테두리보의 거동에 영향을 미치며 안정된 구조를 위해서는 지점의 변형을 적절하게 제한하여야 하며 이와 같은 목적을 위해 단일 첼구조는 타이로드나 타이보에 의해 지점의 이동을 제한하거나 구속할 수 있다. <Fig. 12> - <Fig. 16>은 지점의 수평 변형에 따른 첼구조의 거동을 지점의 이동이 구속된 경우와 비교하여 나타낸 그래프로써 타이로드의 직경을 2.1 in.(53mm)와 3 in.(76mm)의 크기로 구분하여 수평 변형량의 변화에 따른 변화를 동시에 나타내었다.

<Fig. 12>는 지붕높이 2.4m 및 4.8m의 경우에 대한 첼의 모서리부분 및 중앙보의 처짐을 나타낸 그래프이다. 지점의 이동이 구속된 경우에는 모서리부분 및 중앙보의 처짐이 허용범위 이내로

발생하지만 수평변위가 발생하는 경우에는 모서리부분 및 중앙보의 처짐이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 처짐은 타이로드의 직경이 작을수록, 즉 지점의 수평이동이 클수록 증가하는 것을 알 수 있으며 이와 같은 처짐의 증가는 지붕의 경사도가 낮을수록 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 지붕높이 2.4m (1/5경사도)에 직경 2.1 in.(76mm)의 타이로드를 사용한 경우에서 모서리부분의 처짐은 허용처짐량을 초과하는 것으로 나타났다. 모서리보가 있는 첼의 처짐이 모서리보가 없는 경우에 비해 더 크게 나타난 것은 모서리보의 자중이 모서리보의 수직 처짐을 증대시켰기 때문이다. (<Fig. 12> 상단, 중단) 중앙보의 경우는 모서리보와 접하는 절점의 수직 처짐에 의해 전체적으로 수직방향의 강체이동이 발생하였지만 보의 스패를 따라 발생한 수직처짐은 모서리보에 비해 상대적으로 적으며 특히 지붕의 경사도가 높을수록 처짐 발생량이 미미해지는 것으로 나타났다. 또한 중앙보의 처짐은 모서리보의 유무에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

〈Fig. 12〉 Deflections

〈Fig. 13〉은 지점의 수평이동에 따른 부재의 축력의 변화를 나타낸다. 모서리보의 경우(〈Fig. 13〉 상단, 중단)는 지점의 변형이 커질수록 즉, 타이로드의 직경이 작아질수록 스펠의 중앙부에서 축력(압축력)의 크기가 증가하며 특히 지붕의 경사도가 낮아질수록 축력의 크기가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 모서리보가 없는 경우에는 셀 모서리면의 축력은 미미한 크기이지만 수평이동이 발생함에 따라 단부에서 축력의 크기가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 축력의 증가에 따른 모서리면의 셀응력을 감소시키기 위해서는 지점 부분의 셀두께를 충분히 증대할 필요가 있다. 중앙보의 경우(〈Fig. 13〉 하단)의 경우에도 지점의 변형에 비례하여 축력(인장력)의 크기가 증가함을 알 수 있다. 중앙보의 축력은 모서리보에 비해 상대적으로 작고 모서리보의 유무에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

〈Fig. 14〉는 지점의 수평변위에 따른 휨모멘트의 변화를 나타낸 그래프이다. 지점의 이동이 구속된 경우에는 모서리보의 중앙부에서 부모멘트가 발생하지만 지점의 수평이동이 발생함으로 인해 모서리보의 중앙부는 정모멘트로 변화가 됨을 알 수 있다. 다만 이와 같은 모멘트의 변화는 지붕의 경사도가 낮은 경우에 두드러지게 나타나며 지붕의 경사도가 큰 경우에는 모서리보의 중앙부 정모멘트에 약간의 증가가 발생하는 반면 오히려 모서리보의 중앙부 부모멘트가 줄어드는 효과가 있음을 알 수 있다. 따라서 지붕의 경사도가 낮은 경우에는 지점의 수평이동에 의한 모멘트의 증가에 유의하여야 한다. 중앙보의 모멘트 역시 지붕의 경사도가 낮아짐에 따라 모멘트의 크기가 증가하지만 모멘트의 절대 크기가 미미하여 수평이동 및 모서리보의 유무에 의해 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

〈Fig. 13〉 Axial Forces

〈Fig. 14〉 Bending Moments

지점의 수평변위에 따른 셸응력의 변화는 <Fig. 15> 및 <Fig. 16>에 나타냈다. <Fig. 15>는 지점을 대각선 방향으로 연결하는 압축아치 방향의 셸응력을 나타낸 것으로 지점의 수평이동에 따라 지붕의 꼭지점 부분의 압축응력이 증가하고 중앙부에서는 다소 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 꼭지점 부분의 응력 증가는 지붕의 경사도가 낮을수록 그리고 모서리보가 없는 경우에 더욱 두드러지는 것을 알 수 있다. 지점부분에서의 셸응력은 모서리보의 유무에 크게 영향을 받는다. 모서리보가 있는 경우의 셸응력은 지점의 수평변위가 발생하여도 크게 증가하지 않는 반면 모서리보가 없는 경우에는 셸응력이 지점 근처에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이와같은 셸응력의 증가는 지붕의 경사도가 높은 경우에도 동

일한 양상으로 나타난다. 따라서 모서리보를 생략하기 위해서는 지점의 수평이동에 따른 셸응력의 증가를 고려하여 지점부분의 셸두께를 충분히 두껍게 하여 셸의 압축응력이 허용응력 이내가 되도록 유의하여야 한다.

<Fig. 16>은 인장아치의 셸인장응력을 나타내는 그림으로 가운데 부분에서 최대 인장응력이 발생하며 인장응력의 크기는 수평변위에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 인장응력은 모서리보가 없는 경우에 더욱 증가하며 이와같은 인장응력의 증가는 특히 지붕의 경사도가 낮을 때 더욱 두드러지게 나타난다. 따라서 지붕의 경사도가 낮은 경우에는 중앙부 꼭지점 부분의 셸의 두께도 충분히 두껍게 해줄 필요가 있다.

<Fig. 15> Shell Stress along Diagonal

〈Fig. 16〉 Shell Stress

4. 결 론

본 연구에서는 지점의 변형을 고려하지 않은 기존의 연구를 확장하여 부등침하 및 타이로드의 인장에 의한 지점의 수평이동을 고려함으로써 지점변형이 쌍곡포물선셸구조에 미치는 영향을 분석하였다. 분석에서는 셸 주변에 테두리보를 갖는 전통적인 형태와 셸 외각면의 모서리보를 제거한 새로운 형태에 대해 각각 검토하였으며 한 지점에 수직, 수평의 변형을 부여하거나 허용하고 이에 따른 셸구조의 거동을 유한요소 해석을 통해 분석하였다. 각 방향의 지점변형에 대해 다음의 사항을 확인하였다.

한 지점에 허용범위 이내의 부등침하가 발생한 셸구조에 대해 셸의 처짐 및 축력, 모멘트의 변화를 분석한 결과, 셸구조에는 처짐, 부재력 및 셸 응력 등이 다소 증가되지만 모서리보의 유무에 관계없이 허용범위를 초과하지는 않는 것으로 나타났다. 따라서 모서리보를 생략해도 안전에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

한편 지점에 수평변형이 발생하는 경우, 모서리보를 포함한 구조물의 수직방향 처짐은 크게 증가할 뿐 아니라 모서리보가 있는 셸구조의 경우는 모멘트가, 모서리보를 없앤 셸구조에서는 셸의 단부 압축응력과 중앙부 인장응력이 크게 증가한다. 특히 지붕의 경사도가 낮고 타이로드의 단면이 작을수록 이와 같은 처짐 및 응력증가는 현저하므로 수평방향으로의 지점 이동이 과도하게 발생하지 않도록 타이로드의 단면을 증대하거나 타이보를 설치하여 반드시 수평방향의 지점 변형을 제어하여야 한다.

- 참고문헌 -

1. Schnobrich W.C., "Umbrella and Gable Roofs", SP-110, ACI, 1988, pp.89-114
2. Kwon, H.J., Yu, E.J. and Rha, C.S., "Finite Element Analysis of Inverted Umbrella-type Hyperbolic Paraboloid Shell", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.11, No.1, 2011, pp.87-95

3. Shaaban A. and Ketchum M.S., "Design of Hipped Hypar Shells", Journal of the Structural Division, 102(ST11), 1976, pp.2151-2161
4. Simmonds S. H., "Effect of Support Movement on Hyperbolic Paraboloid Shells", Journal of Structural Engineering, 115(1), 1989, pp.19-31
5. Jadik T. and Billington D.P., "Gabled Hyperbolic Paraboloid Roofs without Edge Beams", Journal of Structural Engineering, 121(2), 1995, pp.328-335
6. Billington D.P., Thin Shell Concrete Structures, McGraw-Hill Book Company, 2nd Ed., 1982
7. Kim, S.N., Yu, E.J. and Rha, C.S., "Finite Element Analysis of Gabled Hyperbolic Paraboloid Shells", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.12, No.1, 2012, pp.87-98
8. CSI Analysis Reference Manual, 2005
9. Korean Building Code, AIK, 2009

(접 수 일 자 : 2012년 08월 28일)

(심사완료일자 : 2012년 11월 19일)

(게재확정일자 : 2012년 11월 30일)