

# 포스트텐션에 의한 격자 돔형 공간 구조의 거동 특성

김진우\*

\*경상대학교 토목환경공학부, 해양산업연구소

## Behaviour Characteristic of Grid Dome Shaped Space Structures by Post-tensioning

JIN-WOO KIM\*

\*Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

**KEY WORDS:** Ultimate Load Test 극한하중시험, Dome 돔, Nonlinear Analysis 비선형해석, Post-Tensioning 포스트텐션, Space Structure 공간구조

**ABSTRACT:** This paper is concerned with the erection and ultimate load test of dome shaped space structures by post-tensioning. It is a fast and economical method for constructing such a dome by post-tensioning of the cable in bottom chords. This structure consists of uniform pyramids in a flat layouts on the ground, and then the structure is shaped and erected into its final curved space structures. Ultimate load test was performed for dome shaped space structures. The feasibility of the proposed erection method and the reliability of the established geometric model were confirmed with numerical analysis and experimental investigation on a small scale steel model. As a results we can find the most reasonable modeling technique for the prediction of shape formation in practices and we can know the characteristic of the behaviour in ultimate load test for practical design purposes.

### 1. 서 론

공간구조는 체육관이나 전시장 등의 장대 공간을 필요로 하는 곳이나 해양개발을 위한 플랫폼(platform), 송전탑 등 많은 부문에 널리 이용되는 구조형태이다. 이런 구조물의 시공법은 구조 시스템의 형식을 결정하는데 큰 영향을 미치기 때문에 기술자들은 시공이 쉽고 공기를 단축할 수 있는 공법에 대해 큰 관심을 가져왔다. 특히 포스트텐션에 의해 형성되는 공간 트러스 구조는 지상에서 조립되어 최종 구조물이 완성되는 방식으로써 상현재가 편평한 초기의 평면배치 상태의 구조로부터 포스트텐션에 의해 곡선형의 최종 구조물로 완성되어 대형 크레인과 많은 비계가 소요되는 재래적인 공법에 비해 경제적이며 공기를 단축할 수 있는 공법이다. 이때 하현재에는 원하는 최종적인 공간 형상에 따라 미리 결정되는 간극(Gap)이 존재하고 하현재의 내부에는 포스트텐션을 가할 수 있는 강선이 배치된 구조이다.

최근 메커니즘 조건을 만족하면서(Calladine, 1978; Pellegrino and Calladine, 1986) 포스트텐션으로 형성되는 Barrel Vault구조나 돔형 공간 트러스 등에 관하여 이론적인 해석과 실험을 통한 많은 연구가 이루어져 왔다(김진우, 1998, 1999, 2000; Kim and Schmidt, 2000; Schmidt, 1993, 1995,

1998) 이런 연구 결과들은 구조물의 초기와 최종 형상이 미케니즘 조건과 기하학적 적합 조건을 만족한다면 초기의 평면 배치의 구조는 포스트텐션에 의해 원하는 형태의 구조형성이 가능하고 쉽게 시공될 수 있다는 것을 제시하고 있다. 본 논문은 초기상태에 메커니즘을 가지고 있어서 비교적 작은 포스트텐션력으로 쉽게 공간구조의 형성이 가능한 격자돔 형의 공간구조의 시공 과정을 모델실험을 통해 분석해 보고 형상 형성법의 적용성과 신뢰성을 유한요소해석에 의한 수치적인 해석과의 비교 고찰을 통해 알아본다. 그리고 형성된 공간구조의 거동 특성을 파악하기 위한 극한 하중시험의 결과를 분석하여 그 거동을 규명하고자 한다. 특히 본 저자의 선행연구(김진우, 1998, 2000)에서 연구된 구조모델은 돔형성의 기하학적인 형태가 양 또는 음의 곡율을 가진 구조이며 확장 가능하지 않은 단순형의 구조였다. 그러나 본 연구에서 이용된 격자돔 구조는 평면의 배치는 물론 이용하고자 하는 구조물의 크기에 따라 그 크기를 쉽게 확장할 수 있도록 부착장치와 포스트텐션을 가하는 강선의 위치를 고려한 구조이다.

### 2. 돔의 형성과 해석

포스트텐션에 의한 형상 형성의 조건에는 메커니즘 조건과 기하학적 적합 조건이 있다. 메커니즘 조건이란 메커니즘 또는 유사 메커니즘은 구조물의 초기 형상에만 존재하며 최종 형상에는 어떤 메커니즘도 존재하지 않아야 한다는 것인데 그 조건은 맥스웰의 기준에 의해  $R-S+M=0$ 의 식으로 표시된다. 여

제1저자 김진우 연락처: 경남 통영시 인평동

055-640-3150 kim@nongae.gsnu.ac.kr

기서  $R=b(3j-r)$ 이며 정역학적 부정정 차수를 나타내고  $S$ 는 프리스트레스 상태의 수이며  $M$ 은 메커니즘의 수이고  $b$ 는 부재의 수이며  $j$ 는 절점의 수이고  $r$ 은 구조물의 구속의 수(구조물의 강체 이동을 막는데 필요한 최소한의 수)를 나타낸다. 포스트텐션에 의해 형성된 구조의 기하학적 조건은 두 가지가 있다. 첫째 상현재나 웹부재와 같은 간극을 가지지 않은 부재는 큰 변형이 없이 항상 형성의 전후에 같은 길이를 유지해야 하고, 둘째 간극을 가지는 부재 즉 본 연구의 실험모델에서 강선이 배치된 하현재는 절점 사이의 길이가 수축되는 구조라야 한다는 것이다.

본 논문에서 이용된 구조부재의 공학적인 특성과 규격은 Table 1과 같으며 중공 사각형 단면 부재로 이루어진 상현재와 중공 원형 단면부재로 이루어진 웹부재는 보강판을 이용해서 볼트이음으로 연결되어 있다. 웹부재는 그 하부 절점이 용접이음으로 연결되어 있으며 하현재가 연결되는 하부 절점에는 강선을 유도하고 하현재를 고정시키는 장치가 볼트이음으로 연결되어 있다. 그리고 하현재는 그 내부에 프리스트레스가 가해지는 강선이 배치된 12개의 중공 원형 단면으로 구성되어 있다. 전체 구조는 상현재에 포스트텐션을 가하기 전인 초기의 편평한 상태일 때 반경(Fig. 1의 절점1과 절점40 사이의 길이)이 1244.1mm이고 웹의 깊이(Fig. 2의 입면도의 높이)가 250mm인 원형구조이다. 전체 구조를 이루고 있는 기본 구조 단위는 Fig. 1과 같은 피라밋형의 구조단위가 연결되어 있다. 즉 24개의 상현재 및 웹부재가 연결된 원판형으로 제작된 구조물의 중앙점(Fig. 2의 ●표시 부분)을 중심으로 Fig. 1과 같은 3가지 형태의 피라밋형의 구조단위가 서로 연결되어 있다. 이것은 구조물을 이용하고자 하는 규모에 따라 그 크기를 확장할 수 있는 구조로 형성되어 있는데 절점번호 28과 40 부분에 절점의 연결장치를 부착하면 확장할 수 있다. 돔형 공간구조의 형태의 전체적인 평면은 Fig. 2에 나타나 있는데 굵은 실선이 간극을 가진 하현재를 나타내고 있으며 이 하현재의 내부에 배치된 강선이 포스트텐션을 받아 간극이 좁아지는 구조로 되어 있다.

Fig. 2에서 굵은 실선으로 나타낸 총 12개의 하현재 중에서 각각 3개의 하현재가 1개의 강선으로 연결되도록 모두 4개의 독립된 강선을 배치하였는데 각 강선은 가장 외측 피라밋형의 하부 절점과 연결되어 있다. 각 강선의 단부(Fig. 2의 ▲, ■ 표시 부분)에는 포스트텐션을 가하는 동안 강선에 발생하는 Snap Through 현상을 방지하기 위해 정착단을 설치하였으며 정착단에서 발생하는 프리스트레스의 손실은 고려하지 않았다. 포스트텐션을 가하는 동안 4개의 강선에 발생하는 포스트텐션

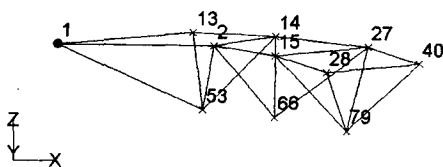


Fig. 1 Basic Structural Unit of Dome Shaped Space Truss

Table 1 Properties of Members

Top Chord	SHS 13×13×1.5 mm
Web Chord	CHS 13×2.5 mm
Bottom Chord	CHS 13×2.5 mm
Strand Area	24.6 mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio ( $\nu$ )	0.3
Yield Stress ( $\sigma_y$ )	Top Chord: 450 MPa Web Chord: 440 MPa Bottom Chord: 440 MPa Strand: 935 MPa
Young's Modulus ( $E$ )	200,000 MPa

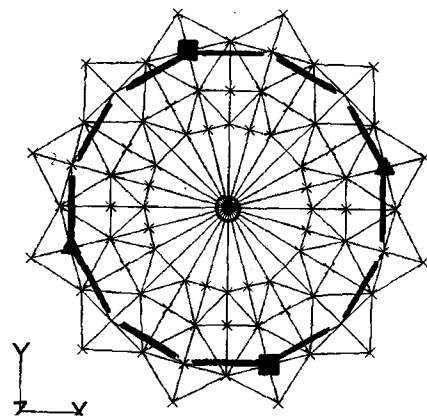


Fig. 2 Planar Geometric Model of Dome Shaped Space Truss

력의 변화를 계측하기 위하여 Load Cell을 설치하였다(■표시 부분).

구조의 형성을 위해 포스트텐션을 가하는 동안 하현재에 배치된 4개의 강선에 동시에 포스트텐션을 가하는 것이 가장 이상적이거나 제한된 장비의 사용에 따라 서로 대칭의 상태에 있는 2개의 강선에 포스트텐션을 가하는 방법으로 항상 형성 실험을 진행하였다.

제하 장치로는 유압잭을 이용하였고 포스트텐션에 의해 돔이 형성될 때 각 절점의 높이의 변화는 덤피 레벨을 이용하여 측정하였다. 포스트텐션으로 형성된 돔형 공간 트러스는 Photo 1과 같다.

돔형성과 같이 구조물의 거동이 큰 변형을 유발하거나 변형률의 변화가 큰 구조물, 사용재료의 응력과 변형률의 관계가 비선형인 구조의 경우는 선형해석만에 의하면 심각한 오차를 발생시킬 수 있기 때문에 각각의 경우에 적합하도록 재료의 비선형 해석이나 기하학적 비선형 해석을 해야 한다(Erling, 1984). 본 실험에서 돔형으로 형성된 구조물의 최종형태를 예측하고 제안된 포스트텐션법의 적합성을 조사하기 위해서 Barrel Vault구조나 돔구조 등과 같은 일반적인 항상 형성 해석에 가장 적당한 프로그램으로 알려진 유한요소 프로그램(MSC/NASTRAN)을 이용하였다. 포스트텐션으로 형성된 돔구

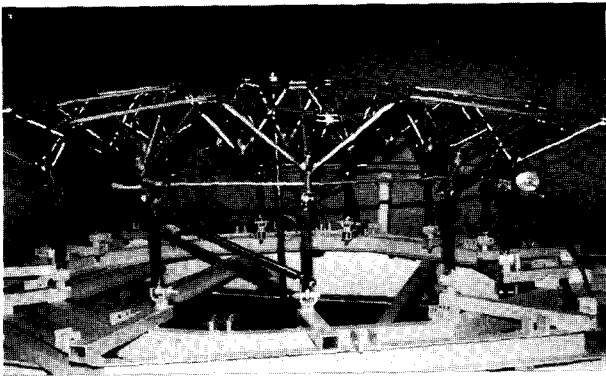


Photo 1 Dome Shaped Space Truss by Posttensioning

조의 형태는 포스트텐션을 가하기 전의 초기형태에 비해 형상이 형성되는 동안 큰 변위가 유발되므로 구조 거동의 비선형성을 고려한 해석을 하기 위해서 비선형 해석을 하였는데 부재를 봉(Rod)요소로 모델링한 경우와 상현재의 휨변형을 고려한 보(Beam)요소로 모델링하였다. 상현재를 보요소로 모델링한 경우에도 웨브부재와 하현재는 휨의 영향이 거의 미치지 않기 때문에 봉요소로 모델링 하였다. 하현재에 있는 간극이 좁아져서 최종적인 돔형 구조물이 형성되는 과정은 하현재에 음의 오프셋을 가해 수축하게 하는 방법으로 모델링하였다. 초기의 평면 배치 상태에서부터 최종적인 구조형태가 결정되면 제안된 포스트텐션 방법으로 원하는 최종적인 형상이 형성되는지를 유한요소해석을 통해 확인할 수 있는데 이 해석을 통해서 포스트텐션 과정 중에 돔구조의 각부재에 유발되는 부재력을 알 수 있으며 실제 돔형성에 필요한 적당한 포스트텐션력을 예측하는데도 이용될 수 있을 뿐 아니라 구조물의 전개과정을 시뮬레이션 하는데도 이용될 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

돔형성을 위해서 포스트텐션을 가하는 동안 하현재에 설치된 Load Cell을 이용해서 포스트텐션력을 실측하였는데 구조모델이 대칭의 관계에 있으므로 서로 대칭되는 위치에 있는 Load Cell의 값을 실측하였다. 돔을 형성하기 위해서 가해진 포스트텐션력은 3.05~3.45kN의 값을 나타내었다. 이와 같이 돔형성의 과정 중에 포스트텐션력이 아주 작은 값을 보이는 것은 돔형성 전에 구조모델의 초기상태가 메커니즘 상태에 있기 때문인데 이것은 작은 포스트텐션으로도 돔구조의 형성이 가능함을 나타내고 있다.

Fig. 3은 돔형성의 유한요소해석의 결과와 몇몇 상부 절점의 수직변위에 대한 실측치를 나타낸 것이다. 상현재를 봉요소와 보요소로 각각 모델링하여 선형 및 비선형 유한요소 해석을 한 결과를 나타낸 그림에서 알 수 있는 바와 같이 비선형 유한요소 해석에 의한 돔형성의 개형이 비교적 실측치에 가까운 형태임을 알 수 있다.

각각의 해석과 실측치의 결과 상현재를 보요소로 모델링하

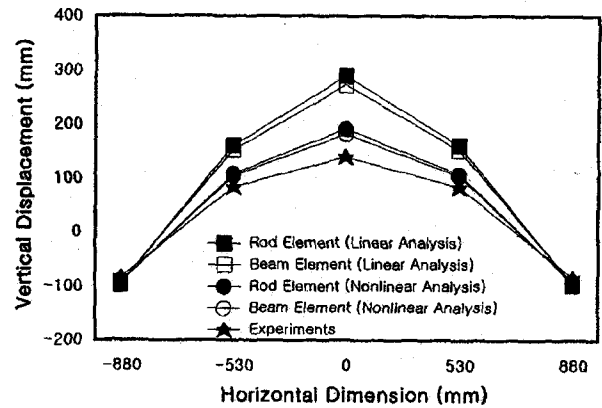


Fig. 3 Shape and Deflection of Top Joints in Dome

여 비선형 유한요소 해석을 한 것이 실측치에 비교적 접근함을 알 수 있으나 구조모델의 중앙부분(Fig. 3의 수평축에서 0 점)으로 올수록 그 값의 차이가 크기 때문에 이런 차이점에 대해서는 많은 연구가 요구된다. 더구나 일반적인 트러스 구조에서 해석이나 설계를 할 때 부재를 봉요소로 모델링하는 경우가 대부분인데 본 실험모델에서 분석된 비선형 유한요소 해석의 결과에 의하면 실측치와 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 보요소로 모델링 한 비선형 유한요소해석의 경우는 다른 모델링 방법에 비해서 실측치에 다소 가까운 값을 보였는데 이것은 공간 트러스 구조의 해석이나 설계시 반드시 고려되어야 할 것으로 생각된다. 그러나 비교적 실측치에 근사한 것으로 밝혀진 보요소로 모델링 된 해석법도 실측치와는 다소간의 차이가 있음에 유의하여야 한다. 특히 본 구조실험에서 제작된 모델은 그 중앙점(Fig. 4의 ●표시 부분)이 상현재와 웨브부재가 집중되는 연결점으로 원형판으로 제작되어 있어서 다른 절점에 비해 강성이 크기 때문에 돔형성시 처짐이 작게 발생되어 해석과 실측치는 다소간의 차이를 보이고 있는데 이 부분을 적당한 형태의 격자모양으로 모델을 제작한다면 절점의 강성이 달라지므로 또 다른 변형의 경향을 보일 것으로 판단된다. 그리고 구조모델실험에서 상현재의 휨변형을 육안 관찰로 확인하였는데 이것은 트러스의 상현재를 보요소로 모델링하고 웨브부재와 하현재를 봉요소로 모델링한 것이 타당하며 이 경우에 해석한 값도 비교적 실측치에 접근한다는 실험의 결과와도 잘 부합되는 것으로 구조 해석의 모델링 방법에 있어서 반드시 고려해야 할 것으로 생각된다. Fig. 4에는 극한 하중 시험을 하기 위해서 하중 재하용 프레임에 설치된 구조모델의 지지조건, 극한 하중 시험 후 좌굴된 웨브부재 등을 나타내었고 Fig. 5는 극한 하중 시험을 할 때 구조모델의 중앙점(Fig. 4의 ●표시 부분)의 수직 처짐을 LVDT를 통해서 측정한 결과와 덤피레벨을 이용해서 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이때 LVDT로 측정한 처짐은 재하장치 연결부의 느슨함이나 변형을 모두 포함하게 되므로 이런 오차를 제거하기 위해서 레벨을 이용한 처짐 측정을 병행하였는데 서로 비슷한 경향을 보이고 있으며 대체적으로 LVDT에 의한 값이 큰 경향을 나타내고 있었다. 재하 하중이 17kN, 19.2kN, 22.4kN, 22.8kN, 26.7kN일 때

부재 연결부의 보강판의 미끄러짐 현상을 관찰할 수 있었고 재하 하중이 40.8kN일때 4개의 웹부재(Fig. 4의 ■표시 부분)에 좌굴이 발생되었는데 좌굴의 발생과 동시에 구조전체에는 횡변위가 발생되면서 구조물 전체의 회전이 발생하였다. 구조모델의 자중이 60Kg인데 좌굴 발생시의 극한 하중이 40.8kN이므로 이 구조는 자중의 70 배 정도의 하중에 저항할 수 있음을 나타내었다. 이것은 구조물의 극한 하중능력은 웹부재의 좌굴에 지배됨이 참고문헌(김진우, 2000)의 경우와 같다. 참고문헌(Schmidt et al, 1998)과 같은 공간 구조가 자중의 48배 정도의 하중에 저항할 수 있는 것에 비해 본 연구에서 이용된 구조물의 경우는 70배 정도의 상대적으로 큰 값을 보이고 있었다.

좌굴이 발생된 웹부재는 포스트텐션이 가해진 하현재의 절점에 연결된 웹부재로 이는 하현재와 웹부재의 연결부의 편심에 의해 응력이 집중된 결과에 의한 것으로 판단된다. 이런 편심을 줄일 수 있는 절점 연결 부분의 보완이 필요한데 이를 보완한 구조물에 대한 시험결과는 현재 정리 중에 있다.

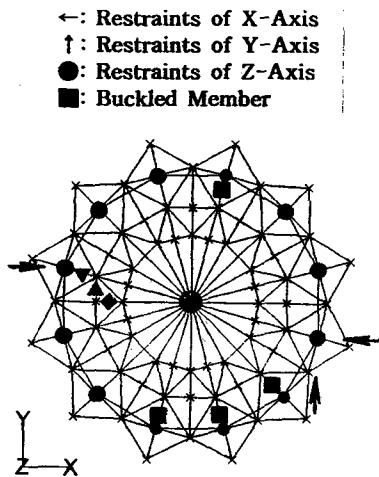


Fig. 4 Locations of the Buckled Members and the Constraints in the Ultimate Load Test

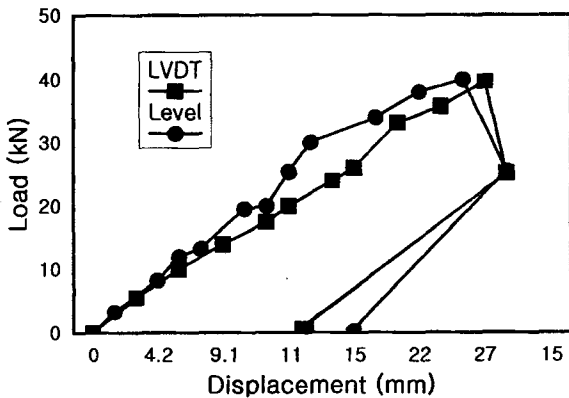


Fig. 5 Deflection-Force of Top Joint in Ultimate Load Test

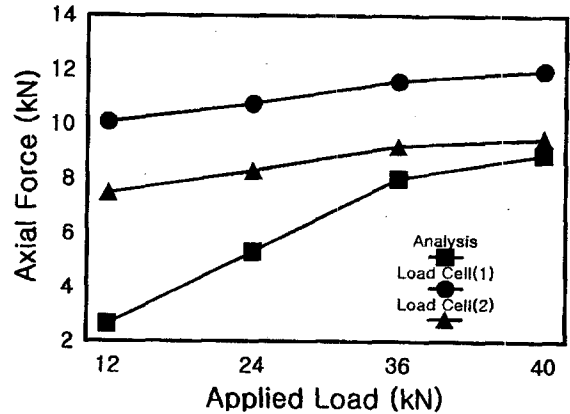


Fig. 6 Forces in Load Cell for the Ultimate Load Test and Analysis

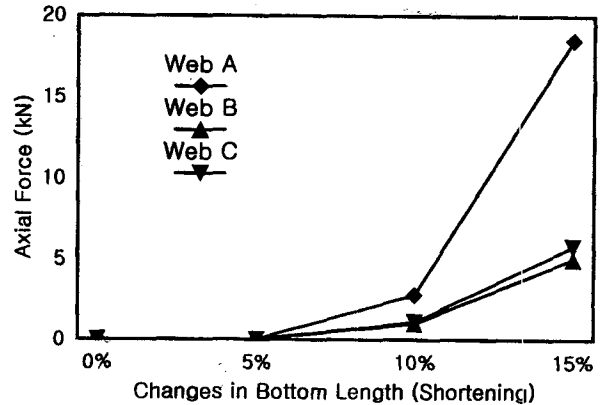


Fig. 7 Axial Forces in Certain Member according to the Changes in Bottom Chord Length

다. 그리고 재하 하중을 완전히 제거하였을 때 구조모델의 중앙점은 덤피레벨에 의한 측정값으로 15mm의 영구적인 수직 변형을 나타내었다.

Fig. 6은 극한 하중 시험 중에 하현재에 설치된 Load Cell에 의해 측정된 축력과 비선형 유한요소해석에 의한 축력의 결과를 비교한 것인데 수직으로 재하된 하중이 증가해도 Load Cell에 의해 측정된 하현재의 축력의 증가는 큰 변화가 없으나 유한요소해석에 의한 축력은 재하된 하중이 증가함에 따라 다소 많은 증가를 보이고 있다. 그러나 실측치보다는 작은 값을 나타내고 있는데 이런 결과는 하현재의 경우 돔 형성시에 가해진 포스트텐션력의 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 하현재의 길이 변화 즉 간극의 크기에 따라 웹부재에 발생하는 축력의 변화를 유한요소 해석의 결과로 나타낸 것이다. Fig. 4에서 ◆, ▲, ▼로 표시된 3개의 웹부재 중에서 특히 ◆표시된 웹부재의 경우 길이의 변화가 10%일 때부터 급격한 축력의 증가를 보이고 있으므로 최종적인 돔형의 기하학적 형태를 결정하기 위해서 하현재의 길이를 조절할 경우에

이런 변화의 경향을 반드시 참고해야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

(1) 비교적 작은 포스트텐션력에 의해 격자돔 형태의 공간구조의 시공이 가능함을 제시하였다.

(2) 포스트텐션에 의해 시공되는 돔 형태의 공간구조에 대해서 비선형 유한요소 해석을 할 때 상현재를 보조요소로 모델링하는 것이 구조형태를 예측하는 실측치에 가장 가까운 해석법이다. 그러나 비선형 유한요소 해석에 의한 이론값과 실측치는 다소의 차이를 보이고 있으므로 이 부분에 대해서는 더 많은 연구가 요구된다.

(3) 시험모델에서 구조물의 파괴는 웨브부재의 좌굴에 지배되고 구조 모델의 극한 하중 시험시에 40.8kN의 재하 하중에서 웨브부재가 좌굴되었는데 이는 전체 구조물의 자중의 70배 정도의 하중에 저항할 수 있음을 나타내고 있다.

(4) 재하 하중에 의해 부재에 발생하는 축력은 유한요소해석에 의한 결과와는 차이를 보이고 있으며 공간구조를 설계할 때 이런 결과를 반영해야 할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

김진우, Schmidt, L. C. (1998). "돔형 공간트러스의 형성과 거동", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제1호, pp 85-88.  
 김진우 (1998). "돔형 공간트러스의 비선형 거동", 한국해양공학회지, 제12권 제4호, pp 1-7.  
 김진우 (1999). "다이아몬드형 격자돔의 형성과 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제1호, pp 185-188.

김진우 (2000). "돔형 공간트러스의 해석과 실험", 대한토목학회논문집, 제20권 제1-A호, pp 39-46.  
 Calladine, C. R. (1978). "Buckminster Fuller's Tensegrity Structures and Clerk Maxwell's Rule for the Construction of Stiff Frames", Int. J. Solids Struct., Vol 14, No 3, pp 161-172.  
 Smith, E. A. (1984). "Space Truss Nonlinear Analysis", J. Struc. Eng., ASCE, Vol 110, No 4, pp 688-705.  
 Kim, J. W. and Schmidt, L. C. (2000). "Test of Deployable Dome-Shaped Space Truss", International Conference on Computing in Civil and Building Engineering CA, USA, Vol 1, pp 66-73.  
 Pellegrino, S. and Calladine, C. R. (1986). "Matrix Analysis of Statically and Kinematically Indeterminate Frameworks", Int. J. Solids Struct., Vol 22, No 4, pp 409-428.  
 Schmidt, L. C. and Dehdashti, G. (1993). "Shape Creation and Erection of Metal Space Structures by Means of Post-tensioning", Space Struc. Vol 4, Thomas Telford, London, England, pp 69-77.  
 Schmidt, L. C. and Li, H. (1995). "Geometric Models of Deployable Metal Domes", J. Architectural Eng., Vol 1, No 3, pp 115-120.  
 Schmidt, L. C. and Li, H. (1998). "Post-tensioned and Shaped Hexagonal Grid Dome: Test and Analysis", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol 124, No 6, pp 696-703.

2001년 1월 26일 원고 접수  
 2001년 6월 27일 최종 수정본 채택