

포스트텐션에 의해 시공된 공간 트러스의 거동

김진우

경상대학교 토목환경공학부

Behaviour of Space Truss Erected by Post-tensioning

Kim Jin-Woo

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Kyeongnam 650-160, Korea

KEY WORDS: Mechanism 미케니즘, Nonlinear 비선형, Post-tensioning 포스트텐션닝, Space truss 공간트러스.

Abstract: This paper suggests that post-tensioned and dome-shaped space truss formed by post-tensioning is easy to fabricate in construction process. In particular, a laboratory model is used to show how a flat space truss system can be transformed into a dome-shaped space truss by means of post-tensioning. There are some discrepancy in vertical displacement of the experiment and theoretical analysis for space truss. Nonlinear analysis is used to predict the final shape of the space truss, the experiments indicates that this construction method can offer economy over traditional methods. In addition, the analysis indicates that when all the existing mechanisms are controlled, the nonlinear finite element method is more reliable way to predict the shape of the dome-shaped space truss than the linear analysis.

I. 서론

공간구조는 체육관이나 전시장 등의 장대 경간의 실내공간이나 해양개발을 위한 platform, 송전탑 등 많은 부문에 이용되는 구조형태이며 최근 들어서는 국내에서도 월드컵 경기장 등의 각종 돔구조의 형태가 많이 이용되고 있다. 특히 포스트텐션에 의해 형성되는 공간 트러스 구조는 그 전체구조가 지상에서 조립되는 방식인데 상, 하현재가 초기의 평면배치 상태의 구조로부터 포스트텐션에 의해 곡선형의 최종 구조물로 완성되는 형태로 대형 크레인과 많은 비계를 동원해야 하는 재래적인 공법에 비해 경제적인

공법이다. 하현재에는 원하는 최종적인 공간형상에 따라 미리 결정되는 Gap이 존재하고 그 내부에는 포스트텐션을 가할 수 있는 강선이 배치되어 있다. 최근에 전개 구조물(Deployable Structure)의 일종으로 포스트텐션에 의해 형성되는 공간 트러스 등에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다.(김진우, L. C. Schmidt,1998a; 김진우,1998b; 김진우, 1999; 김진우, 2000; Kim, J. W. and L. C. Schmidt, 2000; Schmidt, L. C. and Dehdashti, G., 1993; Schmidt, L. C. and Hewen Li., 1995; Schmidt, L. C. and Hewen Li.,1998)이 연구 결과들은 구조물의

형상이 미케니즘 조건을 만족한다면 초기의 편평한 형태의 평면 배치의 구조는 포스트텐션에 의해 원하는 형태의 구조형성이 가능하고 쉽게 시공될 수 있다는 것을 제시하고 있다. 본 논문은 구조물의 초기상태에 미케니즘이 존재하여 비교적 작은 포스트텐션력으로 쉽게 공간트러스의 형상 형성이 가능한 돔 형태의 공간트러스 구조에 대한 형상 형성 과정을 고찰해 보고 본 연구에서 제안된 돔형 공간트러스의 형상 형성법의 적용성을 유한요소해석과 모델시험을 통해 알아본다.

II. 돔의 형상 형성

1. 평면배치 형태와 형상 형성 과정

포스트텐션에 의한 돔형 공간트러스의 형성을 위해서 사용된 부재의 공학적인 특성과 규격은 Table 1과 같으며 돔이 형성된 원리는 Fig.1에 나타낸 것과 같이 평면구조의 하현재에 존재하는 Gap이 제거되는 과정으로 나타낼수 있다. 중공 사각형 단면 부재로 이루어진 상현재는 보강판을 이용해서 웹부재와는 볼트이음으로 연결되어 있다. 웹부재는 중공 원형 단면 부재로 제작되어 그 하부 절점이 용접이음으로 구성되어 있으며 이 하부 절점에는 강선을 유도하는 부착장치가 볼트이음으로 연결되어 있다. 그리고 돔형성 된 최종적인 구조에서 부재로 작용하는 하현재는 그 내부에 프리스트레스를 가하는데 이용되는 강선이 배치된 중공 원형 단면으로 구성되어 있다. Fig. 2에서와 같이 전체 구조는 그 초기의 상현재가 포스트텐션을 가하기 전에 수평을 이루는 상태일 때 돔(I)은 2,946×2,946mm의 크기이며 웹브 깊이가 336mm(■표시부분은 288mm)인 구조이고 돔(II)는 2,488.25×2,488.25mm의 크기에 웹브의 깊이가 250mm인 구조로 되어 있다. 특히 돔(II)는 그 중앙 절점이 24개의 상현재 및 웹부재가 방사형으로 집중 연결된 원판형으로 되어 있으며 돔(II)는 이용하고자 하는 규모에 따라 그 크기를 확장

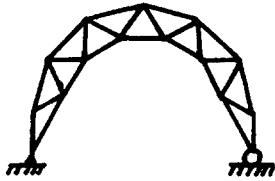
할 수 있는 편리한 구조로 되어 있는데 ●표시 부분을 통해서 확장의 편이를 도모할 수 있다. 굵은 실선으로 표시한 부분은 그 내부에 강선이 배치되어 있는 하현재를 나타내고 있으며 강선이 포스트텐션을 받아 Gap이 좁아지는 구조로 되어 있는데 하현재에 있는 Gap은 Maxwell's Criterion(Calladine, C. R.,1978) 및 공간구조의 전체적인 형상과 돔의 크기에 따라 결정된다. 본 실험에서 포스트텐션으로 돔을 형성할 때 돔(I)의 경우는 13kN, 돔(II)의 경우는 3.45kN의 포스트텐션 하중으로 돔을 형성할 수 있었으며 형성된 돔의 최종적인 형태는 Photo 1에 나타나 있다.

Table 1 Properties of Members for Space Trusses

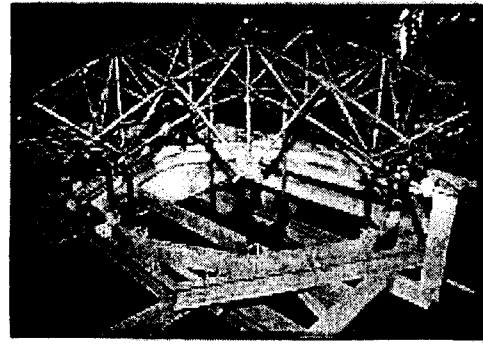
Top Chord	Dome I : SHS 13×13×1.8 mm
	Dome II : SHS 13×13×1.5 mm
Web Chord	Dome I : CHS 13.5×2.3 mm
	Dome II : CHS 13×2.5 mm
Bottom Chord	Dome I : CHS 13.5×2.3 mm
	Dome II : CHS 13×2.5 mm
Strand Area	24.6 mm ²
Poisson's Ratio(ν)	0.3
Yield Stress (σ_y)	Top Chord: 450 MPa Web Chord: 440 MPa Bottom Chord: 440 MPa Strand : 935 MPa
Young's Modulus (E)	200,000 MPa



(a) Assembled in Flat Condition

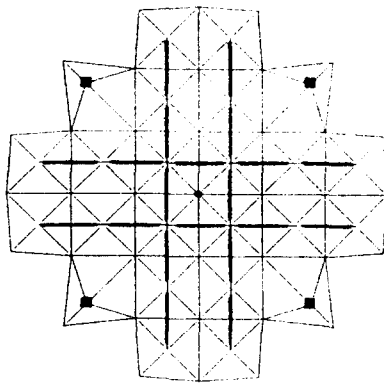


(b) Final Position after Tensioning

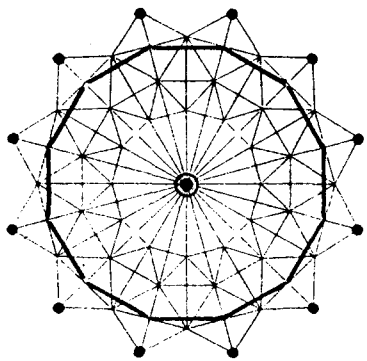


(a) Dome I

Fig. 1 Forming a Curved Truss by Tensioning the bottom Chord

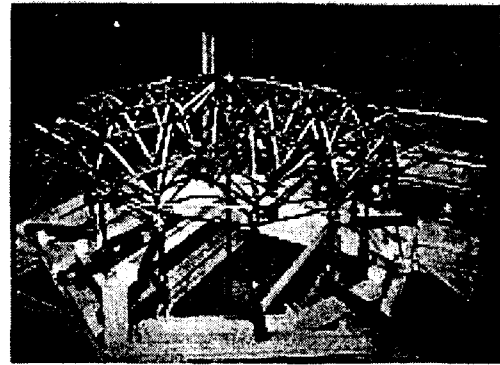


(a) Dome I



(b) Dome II

Fig. 2 Layouts of Dome-Shaped Space Trusses



(b) Dome II

Photo 1 Final Shapes of Space Trusses

2. 유한요소 해석

일반적으로 구조물을 해석할 때 하중과 변위는 선형의 관계에 있으며 응력과 변형률의 관계 또한 선형이고 물체내의 위치에 따른 변형율의 변화는 미소하며 평형조건은 변형전의 기하학적인 형상을 기준으로 한다는 가정 하에서 선형해석이 이루어진다. 그러나 이와 같은 가정과는 다른 상태에 있는 구조물을 해석해야 하는 경우에는 이를 보완하기 위해 비선형해석을 해야 하는데 그 과정이 복잡하다. 일반적으로 구조기능의 비선형성은 재료의 비선형성과 부재의 비선형성 및 구조계의 기하학적 비선형성으로 구분된다.

재료의 비선형성은 재료의 항복과 파괴를 포함하고 부재의 비선형성은 재료의 비선형성을 포함해서 부재의 편심, 구부러짐, 좌굴 등에 관계되며 구조계의 기하학적 비선형성은 구조계의 큰 변형에 의한 영향을 고려해야 한다는 것이다. 즉 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 A. Smith, 1984) 본 연구에서는 돔형으로 형성된 구조물의 최종형태를 예측하고 제안된 포스트텐션법의 적합성을 조사하기 위해서 선형연구의 결과 공간구조의 형상 해석에 가장 적당한 해석 프로그램으로 알려진 유한요소 프로그램을 이용하였다. 포스트텐션으로 형성된 돔형 구조는 포스트텐션을 가하기 전의 초기형태에 비해 형상이 형성되는 동안 큰 변위가 유발되므로 구조 거동의 비선형성을 고려한 비선형 유한요소 해석의 상용 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하였다. 본 연구에서는 하현재에 있는 Gap이 좁아져서 최종적인 구조물이 형성되는 현상을 하현재에 음의 열하중을 가해 수축하게 하는 방법으로 모델링하였다. 유한요소 해석을 이용해서 초기의 평면 배치 상태에서부터 최종적인 구조형태가 결정되면 제안된 포스트텐션 공법으로 원하는 최종적인 형상이 형성되는지를 확인할 수 있다. 이 과정은 포스트텐션 과정 중에 유발되는 부재력을 알 수 있으며 실제 돔형성에 필요한 적당한 포스트텐션력을 예측하는데도 이용될 수 있을 뿐 아니라 유한요소 해석법은 구조물의 전개과정을 시뮬레이션 하는데도 이용될 수 있다.

III. 결과 고찰

돔형성에 있어서 돔(I)과 돔(II)에 가해진 포스트텐션 하중의 차이는 각 모델의 제작방

식에 따른 구조적인 특성에 의한 것이다. Fig. 3은 돔(I)에 대해서 형성된 돔형의 구조물에 대해 상현재의 각 절점의 수직변위를 실측한 값과 선형 및 비선형 유한요소해석에 의한 절점의 수직변위의 값을 표시한 것이다. 상현재의 절점에 대한 수직변위의 경우 실측치와 비선형 유한요소해석의 결과치가 거의 일치함을 보이고 있다. 그러나 선형해석에 의한 수직변위의 값은 실측치와는 큰 차이를 보이고 있고 전체적으로 보면 돔형의 구조물을 형성할 때 비선형 유한요소 해석법에 의해 형성된 구조물의 형상이 선형해석에 의한 값보다는 실험치에 잘 일치하고 있다. 그 외에 실측치와 비선형 유한요소 해석에 의한 값이 다소의 차이를 보이는 원인은 실험 모델의 제작시 절점을 연결할 때 생기는 부재의 편심, 절점의 마찰 또는 절점의 회전과 미끄러짐 현상이나 상현재를 연결하기 위한 천공부분에 의해서 유발되는 부재의 강성도의 저하 등 여러 가지 요인이 있는 것으로 생각된다. 이런 여러 가지 요인들이 돔형의 구조가 형성되는 일반적인 형태에 영향을 미치는 것으로 판단되고 이런 점이 고려된 돔형 구조물의 설계와 시공에 대한 많은 연구가 요구된다. 그러나 본 연구에서 포스트텐션에 의한 공간트러스의 절점 거동의 일반적인 경향은 공간트러스 형성에 있어서 비선형 유한요소 해석에 의한 구조 거동의 예측을 가능하게 하고 있다.

Fig. 4는 돔(II)에 대한 유한요소해석의 결과와 돔형성의 실측치를 나타낸 것인데 일반적인 거동은 모델 I의 경우와 같다. 그리고 선형 및 비선형 유한요소 해석을 한 결과를 나타낸 그림에서 알 수 있는 것과 같이 비선형 유한요소 해석에 의해서 돔형성의 일반적인 개형을 예측할 수 있다. 특히 돔(II)에서 그 중앙점(Fig. 2의 (b)의 ●표시 부분)은 24개의 상현재 및 웨브부재가 연결되는 원판으로 구성된 구조로 제작되어 있어서 다른 절점에 비해 강성이 큰데 이런 구조적인 특성을 가진 중앙점을 다른 절점과 같이 모델링함에 따라 실측치와 해석치가 차이를 보이고 있다. 따라서 이 부분을 해석할 때 원판으로

모델링해서 해석하거나 또는 적당한 형태의 격자모양으로 모델을 제작한다면 선행연구의 결과와 비슷한 경향을 보일 것으로 생각되는데 이런 특정한 절점의 형식에 대해서는 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

이상의 결과와 같이 비선형 유한요소 해석을 돔형 공간트러스에 이용하면 구조물의 최종적인 형상을 예측할 수 있고 형상 형성 후의 모든 절점의 좌표가 얻어질 수 있으며 포스트텐션 하중의 예측이 가능하다. 그리고 하 현재의 Gap의 길이를 조절하면 원하는 형태의 공간구조 형상을 결정할 수 있다.

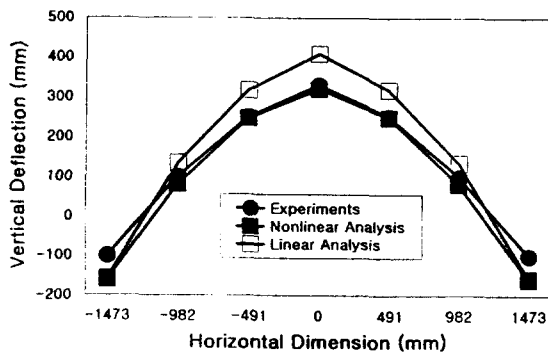


Fig. 3 Shape and Positions of Upper Chords in Dome I.

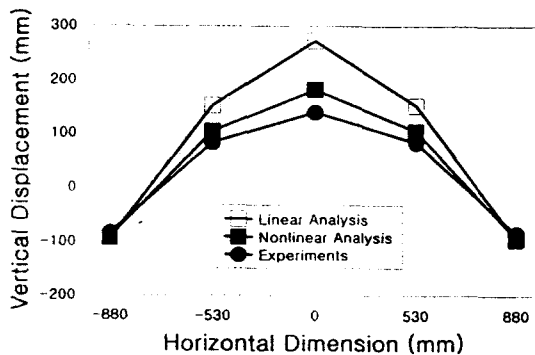


Fig. 4 Shape and Positions of Upper Chords in Dome II.

IV. 결론

1. 비교적 작은 포스트텐션으로 여러 형태의 공간트러스의 형성이 가능함을 제시하였다.
2. 포스트텐션에 의해 형성되는 돔 형태의 공간트러스는 비선형 유한요소 해석으로 형상을 예측할 수 있다.
3. 돔(I)에 비해서 돔(II)는 비선형 유한요소 해석에 의한 이론값과 실측치가 차이를 보이고 있는데 이것은 원판으로 구성된 중앙 절점의 강성에 의한 것으로 판단된다.
4. 포스트텐션에 의한 공간트러스 구조의 형상 형성은 시공에 필요한 비계나 대형 크레인이 필요하지 않으므로 재래적인 공법에 비해 경제적인 시공법이 될 수 있다.

V. 참고문헌

- 김진우, L. C. Schmidt(1998a). "돔형 공간트러스의 형성과 거동", 대한토목학회 학술 발표 대회 논문집, Vol. 1, pp.85-88.
- 김진우(1998b). "돔형 공간트러스의 비선형 거동", 한국해양공학회지, 12권, 4호, pp.1-7.
- 김진우(1999) "다이아몬드형 격자돔의 형성과 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol.1, 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 and Struct., 14(3), pp.161-172.
- Erling A. Smith.(1984). "Space Truss Nonlinear Analysis", J. Struc. Engra., ASCE 110(4), pp.688-705.

- Kim, J. W. and L. C. Schmidt(2000). "Test of Deployable Dome-Shaped Space Truss", International Conference on Computing in Civil and Building Engineering(IIICCBE-VIII), California(USA), Vol. 1, pp.66-73.
- Schmidt, L. C. and Dehdashti, G.(1993). "Shape creation and erection of metal space structures by means of post-tensioning", Space Struc. 4, Thomas Telford, London, England, pp.69-77.
- Schmidt, L. C. and Hewen Li.(1995). "Geometric models of deployable metal domes", J. Arch., Engrg., Vol. 1, No. 3, Sep., pp.115-120.
- Schmidt, L. C. and Hewen Li.(1998). "Post-tensioned and shaped hexagonal grid dome: test and analysis", J. of Structural Engineering, ASCE, 124(6), pp.696-703.