

# 단층 래티스 돔의 비탄성 거동에 대한 실험연구

## Experimental Study on the Inelastic Behavior of Single-layer Latticed Dome

김종수\*      김상대\*\*      김명한\*\*\*      오명호\*\*\*\*      신창훈\*\*\*\*\*  
Kim, Jong-Soo      Kim, Sang-Dae      Kim, Myeong-Han      Oh, Myoung-Ho      Shin, Chang-Hoon

### 요약

본 논문에서는 새로이 제안된 접합부를 가진 단층 래티스 돔의 비탄성 거동을 실험적으로 분석하였다. 구조적인 성능과 시공성을 모두 만족시키기 위해서 제안된 새로운 접합부를 적용하여 강관으로 구성된 스펠 7m의 축소 실험모델을 제작하였으며, 하중 전이장치를 이용하여 각 절점에 균일한 하중이 가력되는 정적 재하실험을 수행하였다. 최대 가력하중은 설계하중의 약 1.6배였으며, 일부 부재에서 압축 항복점을 넘어 비탄성 좌굴이 발생하였다. 좌굴 발생 이후에는 가력장치가 허용할 수 있는 변위까지 실험을 수행하였으며, 실험을 통해서 구해진 래티스 돔의 거동을 구조설계의 관점에서 분석하였다.

### Abstract

This study discusses the inelastic behavior of single-layer latticed dome, composed of tubular truss member and newly proposed joint sections, through loading test on the scale-down structure. The loading test was performed under displacement control conditions, using loading transfer system for the same value of point loads on all joints. Maximum applied load was nearly 1.6 times of the design load, and inelastic buckling occurred beyond compressive yielding in some members. The displacement of structure was maintained upto the limit of oil jack. The behavior of latticed dome from the loading test was analyzed on the view of structural design practice.

키워드 : 단층 래티스 돔, 비탄성 좌굴, 재하시험, 구조설계

Keywords : Single-layer Latticed Dome, Inelastic Buckling, Loading Test, Structural Design

## 1. 서론

본 논문에서는 새롭게 제안된 접합부를 가진 단층 래티스 돔의 비탄성 거동을 실험적으로 분석하였다. 구조적인 성능과 시공성을 모두 만족시키기 위해서 제안된 새로운 접합부를 적용하여 강관으로 구성된 스펠 7m의 축소 실험모델을 제작하

였으며, 하중전이장치를 이용하여 각 절점에 균일한 하중이 가력되는 정적재하실험을 수행하였다. 정적재하실험을 통해 구해진 래티스 돔의 거동을 탄성구조해석결과와 비교하여 구조설계의 관점에서 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험체 개요

그림 1에 시험체의 형태와 치수를 표시하였다. 시험체는 span 7m, rise 0.845m의 축소모델인 단층 래티스 돔으로 새롭게 제안된 접합부를 적용하여 정적재하실험을 위해 계획되었다. 그림 2에 접합부의 형태를 나타내었다. 단층 래티스 돔을 이

\* 정회원, (주)CS구조엔지니어링, 대표이사  
Tel: 02-3497-7800 Fax:02-3497-7899  
E-mail : cs@cs.co.kr  
\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사  
E-mail : sdk@korea.ac.kr  
\*\* 대진대학교 건축공학과 조교수, 공학박사  
E-mail : mnhk314@daejin.ac.kr  
\*\* 목포대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사  
E-mail : ohmho@mokpo.ac.kr  
\*\* 정회원, (주)CS구조엔지니어링, 소장  
E-mail : hoony@cs.co.kr

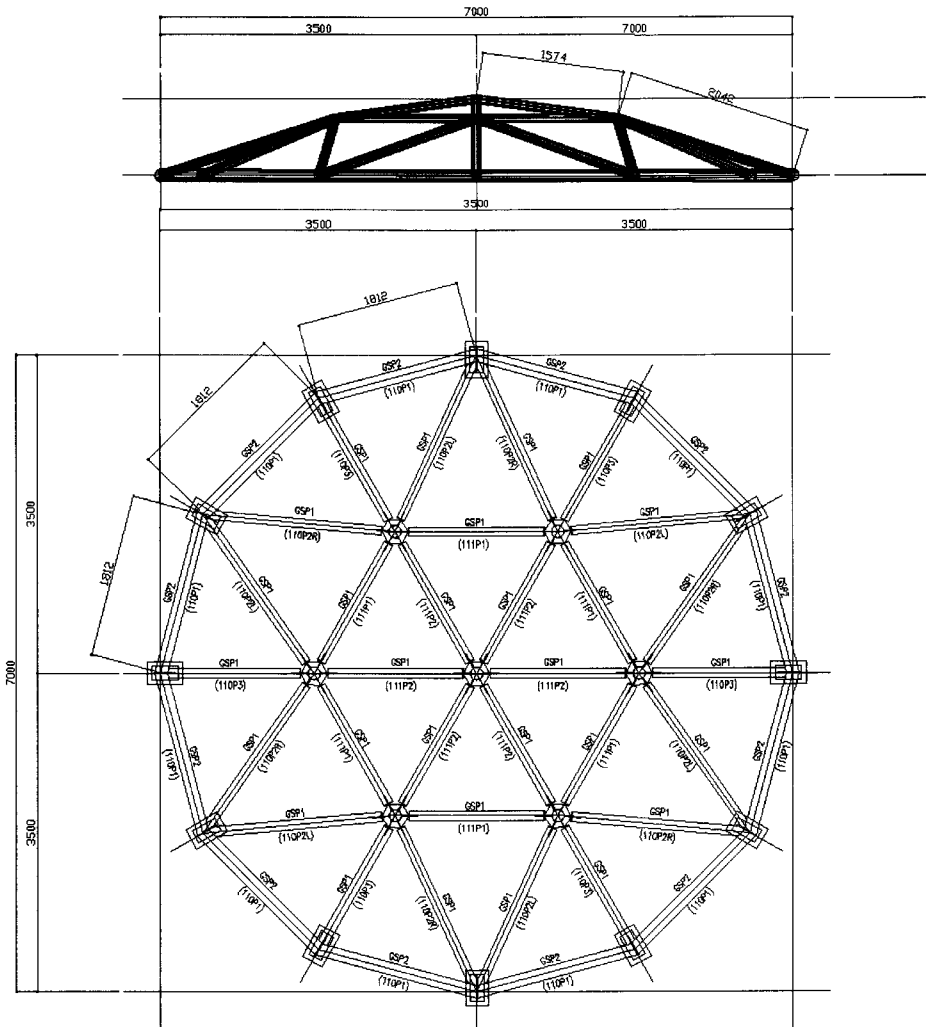


그림 1. 시험체의 형태 및 치수

루는 부재는 재질 SS400인 원형 강관으로 구성되었으며 압축을 받는 부재의 경우 P101.6x3.2t이고, 인장을 받는 링 부재의 경우 P139.8x4.5t로 제작하였다.

접합부의 형태는 원형 강관의 접합을 쉽게 하기 위해 접합부의 정점에 수직으로 원형 강관을 세우고 수직 플레이트를 이용하여 용접한 후, 이러한 플레이트를 접합부로 접합되는 원형강관에 10mm의 홈을 낸 후 서로 용접하여 시공하였다. 또한 접합부에 사용되는 수직 플레이트의 보강을 위해 서로 인접한 수직 플레이트 사이의 상하부분에 수평 플레이트를 이용하여 보강하였다.

또한 시험체 지점부는 중심 방향으로의 롤러를 구현할 수 있도록, 즉 중심 방향으로의 수평변위

는 허용하고 수직변위는 구속할 수 있도록 지점부 하부에 테프론을 시공하여 수평 방향의 변위는 허용하였다(그림 3참조).

## 2.2 가력방법

가력은 정점 및 그 주위의 6개 절점, 총 7절점에 균등하게 가력하기 위하여 하나의 오일잭과 이와 연결된 하중 전이를 위한 보를 이용하였다. 이러한 하중 전이를 위한 보를 설치하기 위해 시험체 아래에 좌대를 약 3.3m 높이로 설치하였고, 이러한 좌대위에 시험체를 올려놓은 후 총 12점에 지점(롤러) 처리를 하였다. 전체적인 시험체 형상은 그림 4와 같다.

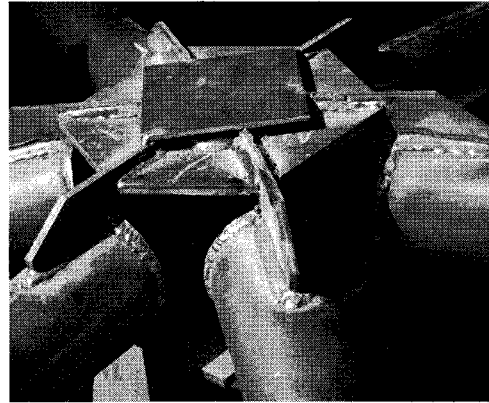
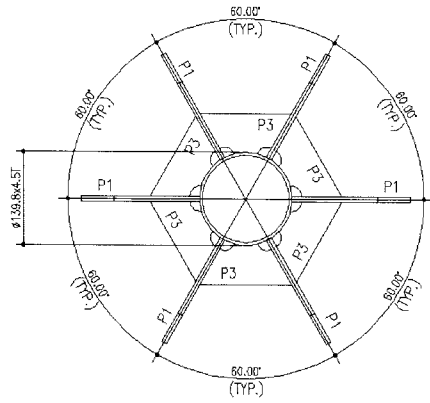


그림 2. 접합부의 형태

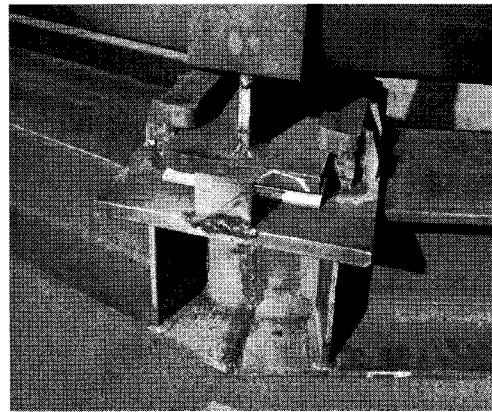
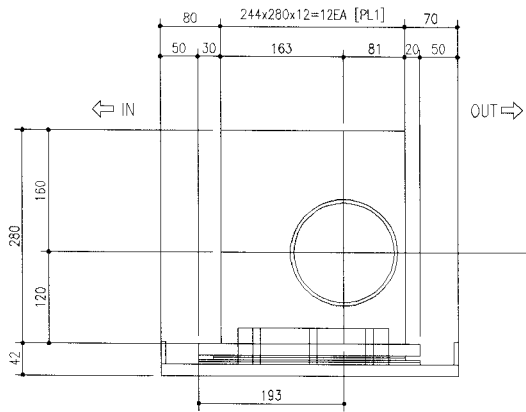


그림 3. 지점부(롤러)의 형태

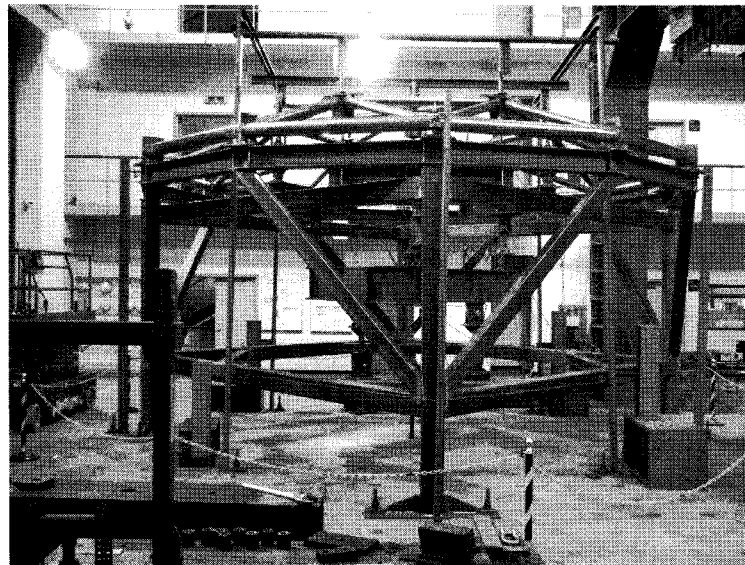


그림 4. 시험체 set-up

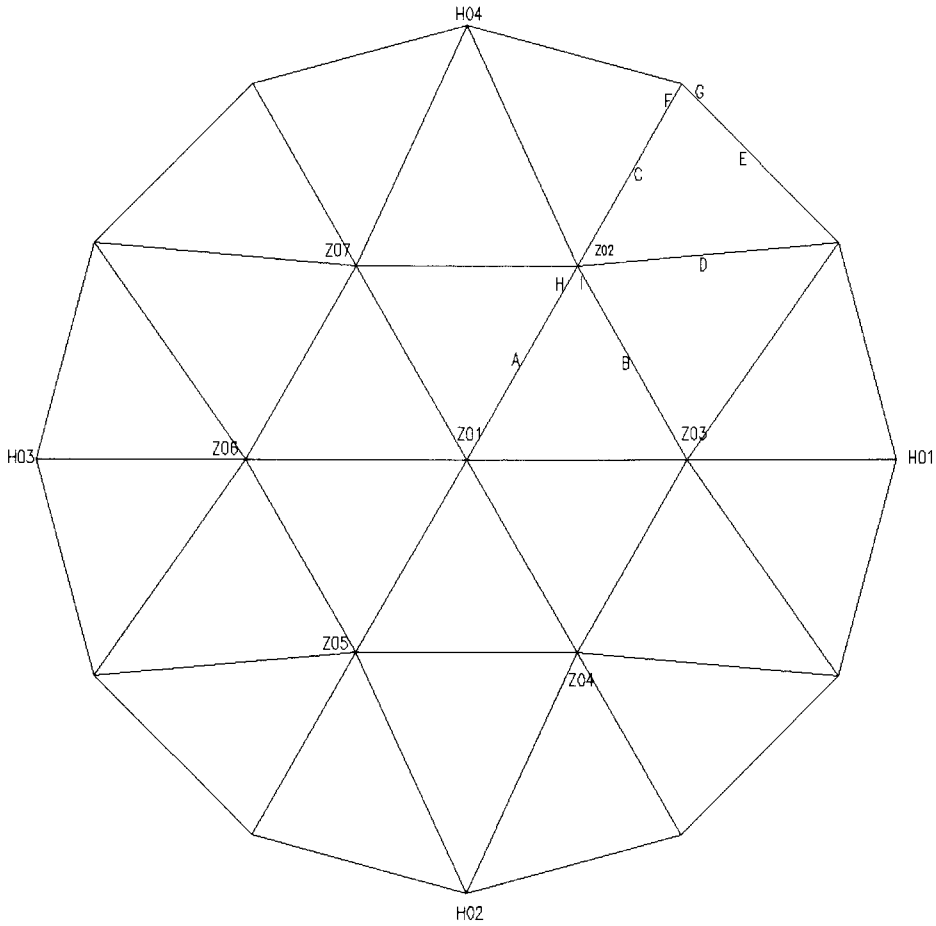


그림 5. 변위계 및 Strain Gage 설치 위치

### 2.3 측정방법

각 절점의 변위는 변위계로, 주요 부재의 변형은 Strain Gage로 측정하였다. 변위는 시험체의 정점 및 그 주위의 6절점, 총 7절점의 수직변위를 측정하였고, 수평변위는 12시, 3시, 6시, 9시 방향의 지점, 모두 4절점에서 측정하였다. 그림 5에 변위계 및 Strain Gage의 측정위치를 나타내었다. 이 그림에서 Z는 수직변위를, H는 수평변위를 표시한다. 또한 시험체의 중앙에서부터 외주에 걸쳐 5종류의 부재가 있기 때문에 각 종류 1개씩 부재 중앙부에 1방향 Strain Gage를 한 군데 당 4개 부착하였다. 또한 최외주의 인장재(E)와 압축재(A, B, C)에서 절점에 가까운 F, G, H, I에도 부착하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 인장시편시험결과

주요 부재인 P101.6x3.2t(SS400)에서 6개의 시험편을 제작하여 소재인장시험을 수행하였다. 시험결과는 다음과 같다.

표 1. 소재인장시험결과

순번	항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	소재
1	459	493	30.0	SS400
2	447	485	29.9	SS400
3	452	490	28.9	SS400
4	454	503	29.8	SS400
5	554	596	27.1	SS400
6	434	487	30.0	SS400
평균	466.7	509.00	29.28	

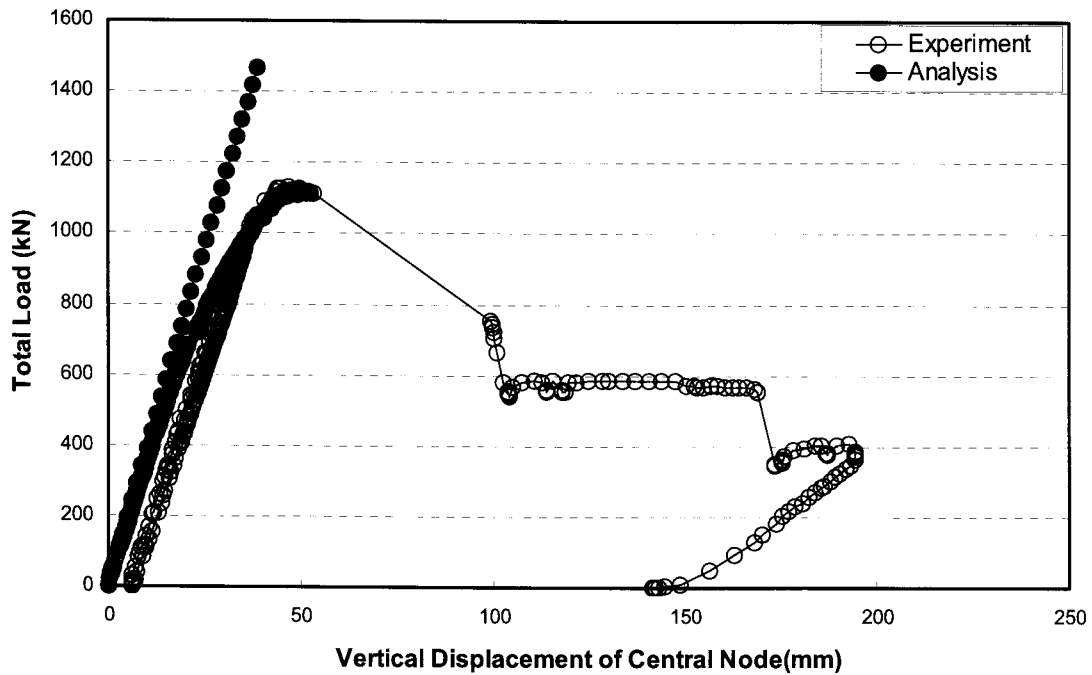


그림 6. 전체하중-정점변위관계곡선

### 3.2 시험체 파괴 양상

실험은 중앙에 있는 오일잭을 이용하여 시험체 정점 변위를 천천히 증가시키는 변위제어방식으로 실시하였다. 정점 변위를 증가시키기 위해 하중을 오일잭으로 가력하면 하중 전이보를 통하여 정점과 그 주변의 6절점, 모두 7절점에 균등하게 하중이 가해질 수 있도록 하였다. 초기 실험은 1,000kN까지 가력하였으나 부재에 어떠한 좌굴도 발생하지 않아 1,000kN 용량의 로드셀을 제거하기 위하여 unloading한 후 재가력을 실시하였다.

부재의 첫 번째 좌굴은 중앙 부근의 압축 부재에서 전체하중 1,120kN, 정점변위 53mm에서 발생하였고, 이후 추가로 정점변위를 증가시켜 두 번째 좌굴은 전체하중 554kN, 정점변위 169mm에서 발생하였다. 이후 정점변위를 200mm까지 증가시킨 후 실험을 종료하였다.

### 3.3 하중-변위관계

#### 3.3.1 전체하중-정점수직변위관계

그림 6에 전체하중에 대한 정점수직변위관계를

나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전체하중이 700kN 근처에서 강성이 저하함을 알 수 있다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 첫 번째 부재좌굴, 두 번째 부재좌굴이 발생하여 급격하게 하중지지 능력이 떨어짐을 알 수 있다.

#### 3.3.2 해석결과와의 비교

그림 6에 실험결과와 해석결과와의 비교를 나타내었다. 해석은 구조실무에서 일반적으로 사용하는 탄성해석을 수행하였다. 접합부의 절점은 강접합으로 지점은 수평의 방사방향에 몰려로서 해석하였다. 그림 8에서 보는바와 같이 약 700kN까지 상당히 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉 위에 서술한 비교적 단순한 가정에 의한 해석으로도 본 시험체와 같은 접합부를 가진 단층 래티스 돔의 경우에는 충분하고 타당한 결과를 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 탄성해석만으로는 부재의 비탄성좌굴하중을 얻을 수 없어 비탄성좌굴해석과 같은 정밀해석에 관한 연구가 추후 수행되어야 할 것으로 생각된다.

Ishikawa와 Kato는 2개의 부재로 이루어진 단층 래티스 돔의 좌굴하중을 다음과 같은 식 (1)로 제안하였다.

표 2. 탄성 상태에서 각 부재의 축력 및 휨 모멘트

위치	축력 (kN)		휨모멘트(kN-m)	
	실험값	해석값	실험값	해석값
A	-104.5	-106.3	1.17	0.56
H	-77.0	-106.3	4.52	1.32
B	-69.6	-80.4	1.02	0.56
I	-48.7	-80.4	2.37	0.56
C	-107.4	-121.5	1.66	0.17
F	-126.9	-121.5	3.52	0.66
D	-64.2	-65.7	0.39	0.28
E	+203.1	+220.2	0.49	1.38
G	+194.3	+220.2	1.63	1.36

$$P_{cr} = nEA \frac{\theta_o^3}{3\sqrt{3}} \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 경선 부재의 개수이며,  $\theta_o$ 는 돔의 높이와 스패의 비에 의해 결정되는 각도이다. 식 (1)에 의해 단층 래티스 돔의 좌굴하중을 계산하면 1,044kN으로 산정된다. 이는 실험값 1,120kN과 비교할 때 안전측으로 예측할 수 있어 간단히 좌굴하중을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3.3 각 부재의 축력 및 휨모멘트

표 5에 변형의 측정결과로부터 나온 탄성 상태인 총 하중 490kN에서의 축력 및 휨모멘트를 나타내었다. 탄성 구간에서 부재에 걸리는 압축력 또는 인장력은 해석으로 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이 경우에도 휨 모멘트는 많은 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 실험연구에서 얻은 결론을 간단히 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 수행한 단층 래티스 돔의 구조 내력은 부재 좌굴에서 결정지어지며, 설계 하중의 약 1.6배까지 저항할 수 있어 높은 구조적 안전성을 가지고 있다.

(2) 원형강관의 접합을 위해 새로이 제안된 접합부의 경우 높은 강성과 내력을 가지고 있어 향후 실제 접합부에 적용이 가능하다.

(3) 제안된 접합부를 강접합으로 가정하면 구조 실무에서 사용하는 일반적인 탄성해석만으로도 단층 래티스 돔의 탄성구간 내에서의 내력 및 변형 평가에 적절히 사용할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 연구개발사업의 연구비 지원 (과제번호# 06 건설핵심B03)에 의해 수행되었습니다

### 참고 문헌

1. Ishikawa K, Kato S, Elastic-plastic dynamic buckling analysis of reticular domes subjected to earthquake motion, International Journal of Space Structures, 1997, 12(3-4), 205-215
2. Lopez A, Puente I, Serna M. A., Direct evaluation of the buckling loads of semi-rigidly jointed single-layer latticed domes under symmetric loading, Engineering Structures, 2007, 29, 101-109