단층래티스 돔의 주부재 단면형상에 따른 좌굴특성 검토 (KS규격 기성 강재 사용을 기준으로 함)

A Buckling Characteristics of Single-Layer Lattice Domes according to
Section Shapes of Main Frames
(The Existing Domestically-Produced Structural Steel is used as Main Frames)

정 환 목*
Jung, Hwan-Mok

Abstract

The circular hollow section is usually used for member of main frame to carry the external load in single layer lattice dome. But, the H-shaped section may be used for member of main frame since it is convenient for attaching roof panels. Single layer lattice domes have various buckling characteristics, such as the overall buckling, the member buckling, and nodal buckling. The purpose of this study is to compare buckling characteristics of single-layer lattice domes in which the H-shaped steel section as the existing domestically-produced structural steel is used as main frames to those of domes in which a circular hollow section is used as main frames.

Keywords: Single-layer lattice dome, Buckling characteristics, Circular hollow section, H-shaped steel section

1. 서 론

국민소득의 증가와 함께 대공간 건조물의 수요가 기하급수적으로 증가하고 있다. 대공간 구조물 종류에는 셸구조, 막구조, 스페이스 프레임구조, 케이블 구조와 이 구조를 병용하는 대공간 하이브리드 구조가 있다.

셸구조와 막구조는 연속체구조이며, 스페이스 프레임구조와 케이블구조는 이산체구조이다. 단층래티스 돔은 골조를 구성하는 격자가 이산체로서 스페이스 프레임 구조의 구조원리를 갖고 있으므로 스페이스 프레임구조의 일종이라고 볼 수 있다.

단층래티스 돔의 경우 주 골조는 주로 강관을 많이 사용하며, 원형강관을 사용하는 경우의 연구는 매우 활발하고 이루어지고 있다.¹⁻⁹⁾

그러나 기성재 활용의 용이성 및 지붕재 마감효

과의 장점 등으로 주골조로서 H형강을 사용할 수도 있을 것이나, 아직 H형강을 단층래티스 돔의 연구 사례는 많지 않다. H형강을 사용한 단층래티스 돔의 실현을 위해서는 기왕의 연구 데이터가 풍부한 강관을 사용한 래티스돔의 연구사례를 응용할 필요가 있다. 특히 단층래티스 돔의 경우 대공간 구조물의 특성상 구조물의 거동연구와 더불어 안정성 검토가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 생산되는 기성강재인 H형강을 주 골조로 사용하는 단층래티스 돔의 좌굴특성을 원형강관을 주 골조로 사용하는 돔의 좌굴특성과 상호 비교 검토하는 것이다.

2. 모델 및 해석방법

2.1 형상모델

본 연구의 해석모델 형상은 <Fig. 1>에서 나타내는 골조 격자를 가지는 단층래티스 돔이다. <Fig. 1(a)>는 돔의 단면을 나타내며, 여기서 R은 돔 지붕의 곡률반경, r은 돔의 저면 반경, h는 돔의 높이이다. <Fig. 1 (b),(C)>는 각각 돔의 격자 패턴과 절점 번호 및 부재번호를 나타낸다.

* 정희원, 경동대학교 도시공간디자인학과 교수, 공학박사
Department of Urban Space Design on Architecture,
Kyungdong Univ.
Tel: 033-639-0180, 639-0214 Fax: 033-639-0207
E-mail : hmjung@kl.ac.kr

(a) Shape of cross section

(b) Lattice patterns and joint number

(c) Lattice patterns and member number

<Fig. 1> Shape of cross section and lattice patterns of the dome

2.2 해석모델

<Table 1> Interpretive model and data (circular hollow section)

모델명	사용부재	S	조건
Ø-508	Ø-508.0*16.8	2.1	* L=6.44 m * L:대표부재길이 * 절점:강접합 * 부재중간절점유 * 지점:고정지점 * 하중:연직하중
Ø-457	Ø-457.2*12.0	2.2	
Ø-355	Ø-355.6*9.0	2.5	
Ø-318	Ø-318.5*8.0	2.6	
Ø-267	Ø-267.4*8.0	2.8	
Ø-216	Ø-216.3*8.0	3.2	
Ø-190	Ø-190.7*6.0	3.4	
Ø-165	Ø-165.2*6.0	3.6	

<Table 2> Interpretive model and data (H-shaped steel section)

모델명	사용부재	S	조건
H-414	H-414×405×18×28	2.0	* L=6.44 m * L:대표부재길이 * 절점:강접합 * 부재중간절점유 * 지점:고정지점 * 하중:연직하중 * H형강단면 : 약축보강유, 약축보강무 두가지 타입 고려
H-350	H-350×350×12×19	2.2	
H-300	H-300×300×10×15	2.4	
H-250	H-250×250×9×14	2.6	
H-200	H-200×200×8×12	2.9	
H-175	H-175×175×7.5×11	3.1	
H-150	H-150×150×7×10	3.4	
H-125	H-125×125×6.5×9	3.7	

<Table 1>과 <Table 2>는 각각 원형강관과 H형강 단면의 해석모델 및 제원을 나타낸다.

<Table 1>과 <Table 2>에서 S는 래티스돔의 형상계수로서 래티스돔의 전체좌굴과 부재좌굴을 구분하기 위해 Yamada에 의해 제안³⁾되었으며, 그 식은 아래와 같다.

$$S = \frac{L}{\sqrt{R}} \left(\frac{K}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

식 (1)에서 R은 곡률반경, L은 프레임의 대표부재길이, D는 면의 휨강성, K는 면내 축강성을 나타낸다.

<Table 1>에서 해석모델은 현재 국내에서 생산되는 기성 강관의 단면크기를 사용하여 돔의 형상계수 S값이 2.1에서 3.6까지 가능한 한 넓게 분포하도록 해석모델을 선정하였다.

<Table 2>는 단면형상에 따른 좌굴특성의 정확한 비교 검토를 위해 가능한 한 <Table 1>에서 나타내는 강관의 경우와 동일한 형상계수값을 가지는 H형강 단면을 선택하고자 하였으나, 이에 해당되는 국

내 생산 기성재품이 없기 때문에 가능한 한 <Table 1> 모델의 형상계수 S 값과 유사한 값을 가지는 H형강 단면을 대상으로 해석모델을 <Table 2>와 같이 선정하였다. 특히 원형강관에서는 축에 따른 강성변화가 나타나지 않지만, H형강의 경우, 압축응력과 휨응력을 받는 부재의 경우 강축과 약축에 대한 좌굴내력은 현저한 차이를 나타낼 것이다. 따라서 실무에서는 약축을 보강하는 방안을 강구한다면 구조물의 강성을 크게 향상시킬 수 있으므로 본 연구에서는 약축을 보강하는 하는 경우와 보강하지 않은 두가지 경우의 해석모델을 도입한다.

2.3 해석방법

본 연구에서는 두가지 종류의 해석법을 적용한다.

하나는 쉘근사해석법인 연속치치환법이며, 다른 하나는 프레임해석법이다.

연속치치환법이란 래티스돔의 격자를 구성하는 이산체 골조의 강성을 연속체 쉘의 강성으로 치환하여 이미 많은 연구에 의해 검증되어 있는 쉘의 좌굴내력식에 이 강성을 대입함으로써 매우 간단하게 거시적 관점에서 대공간 구조물의 안정성 평가 가능하게 하는 실무적으로나 이론적으로 매우 유용한 좌굴해석법이다.

본 연구에서의 연속치치환법은 이미 많은 연구¹⁻⁶⁾에서 그 타당성이 검증된 야마다의 방법을 도입한다.¹⁾

한편, 프레임해석법은 구조물의 거동과 안정성을 미시적 관점에서 세부적으로 검토하고자 할 때 이 해석법을 적용하며, 많은 시간과 노력이 요구된다.

프레임해석법은 3차원 공간을 구성하고 있는 프레임을 기하학적 비선형성을 고려하는 유한요소법에 의해 정식화했으며, 수치계산은 최대변위증분을 갖는 절점변위에 관한 증분법을 적용하고, 각 증분 단계에서 강성행렬의 행렬식을 계산하여서 분기점을 구한다. 또한 이 분기점에서 고유치 해석을 행하여 이 고유벡터로부터 분기좌굴모드를 구한다. 부재좌굴을 검토하기 위하여 골조는 부재중간에 자유도를 두며, 하중은 절점에 연직하중으로 작용하는 것으로 가정한다.

3. 해석결과 및 좌굴특성 분석

3.1 좌굴특성(Buckling Characteristics)

<Table 3> Results of interpretation by models of circular hollow section

Model	S	Qcy (kN/m ²)	Qcr (kN/m ²)	α	Nbuck	BM
Ø-508	2.1	239	238	1.00	8,14	O.B
Ø-457	2.2	140	140	1.00	8,14	O.B
Ø-355	2.5	63.8	62.4	0.98	20,29	O.B
Ø-318	2.6	45.5	45.4	1.00	105,106	M.B
Ø-267	2.8	31.8	27.5	0.86	105,106	M.B
Ø-216	3.2	20.5	14.8	0.72	104,107	M.B
Ø-190	3.4	12.1	7.87	0.65	104,107	M.B
Ø-165	3.6	8.98	5.31	0.59	105,106	M.B

<Table 4> Results of interpretation by models of H-shaped steel section (reinforcing in weak axis)

Model	S	Qcy (kN/m ²)	Qcr (kN/m ²)	α	Nbuck	BM
H-414	2.0	243	246.8	1.01	8,10	O.B
H-350	2.2	123	125.4	1.02	20,29	O.B
H-300	2.4	72.6	74.0	1.02	134,139	M.B
H-250	2.6	46.4	45.2	0.97	104,113	M.B
H-200	2.9	25.5	20.6	0.81	110,119	M.B
H-175	3.1	17.8	13.0	0.73	110,119	M.B
H-150	3.4	12.0	7.5	0.63	110,119	M.B
H-125	3.7	7.4	4.0	0.54	104,107	M.B

<Table 5> Results of interpretation by models of H-shaped steel section (no reinforcing in weak axis)

Model	S	Qcy (kN/m ²)	Qcr (kN/m ²)	α	Nbuck	BM
H-414	2.0	243	134.5	0.55	110,119	M.B
H-350	2.2	123	61.0	0.50	107,116	M.B
H-300	2.4	72.6	31.2	0.43	110,119	M.B
H-250	2.6	46.4	17.5	0.38	104,113	M.B
H-200	2.9	25.5	7.77	0.30	104,113	M.B
H-175	3.1	17.8	4.94	0.28	104,113	M.B
H-150	3.4	12.0	3.05	0.25	108,117	M.B
H-125	3.7	7.4	1.53	0.21	122,128	M.B

<Table 3> ~ <Table 5>는 모델별 해석결과를 나타낸다. <Table 4> ~ <Table 5>는 H형강 모델의 경우 약축보강유, 약축보강무 두가지 type의 해석결과이다.

<Table 3> ~ <Table 5>에서 S 는 돔의 형상계수, Q_{cy} 는 Yamada에 의해 제안된 단층래티스 돔의 연속치치환법에 의한 좌굴내력식¹⁾을 적용하여 구한 좌굴하중값을 나타내며, Q_{cr} 은 유한요소해석법에 의해 구한 돔의 좌굴하중값, α 는 Q_{cr}/Q_{cy} , N_{buck} 는 대표적인 좌굴 절점번호, BM 은 좌굴형태를 나타내며, O.B는 전체좌굴(Overall Buckling), M.B는 부

재좌굴(Member Buckling)을 나타낸다. S 값이 작으면, 좌굴하중값이 크며, Q_{cy} 와 Q_{cr} 의 값이 잘 일치하나, S 가 크면 두 값의 차이가 크다. 이는 Q_{cy} 는 Yamada의 쉘근사해석(Method of Shell Analogy)에 의해 구한 값으로 부재좌굴(Member Buckling)을 고려할 수 없기 때문이다.

<Table 3>에서 알 수 있는 것처럼 원형강관의 경우, $S=2.5$ 이하이면 쉘형좌굴형태인 전체좌굴을 나타내고 있으며, S 값이 그 보다 클 경우에는 쉘에서는 찾아볼 수 없는 단층래티스 돔 고유의 좌굴형태인 부재좌굴을 나타내고 있다.

<Table 4>에서 알 수 있는 것처럼 H형강 약축보강유의 경우 $S=2.2$ 이하이면 전체좌굴을 나타내고 있으며, $S=2.4$ 이상이면 부재좌굴을 나타내고 있다.

<Table 5>에서 알 수 있는 것처럼 H형강 약축보강무의 경우 전 모델에서 부재좌굴이 발생하고 있음을 알 수 있고, 부재의 압축 좌굴로 인해 돔 구조물 전체의 좌굴내력이 현저하게 저하하고 있음을 알 수 있다.

축에 대한 단면보강을 함으로써 구조물 강성을 크게 증가시킬 수 있음을 나타낸다.

<Fig. 3>은 각 모델의 $S - \alpha$ 관계곡선을 나타낸다. 그림에서 $\alpha=1$ 은 야마다의 쉘형좌굴하중값과 프레임 해석에 의한 좌굴하중값이 동일한 선을 나타낸다. 단층래티스 돔의 경우, $\alpha=1$ 의 의미는 연속체치환해석에 의한 좌굴내력값이나 프레임해석에 의한 좌굴내력값이 같다는 것을 의미하며, 이 경우 단층래티스 돔은 좌굴모드 뿐만 아니라 좌굴내력면에서도 쉘형의 좌굴특성을 나타내고 있음을 의미한다. 원형 단면의 경우, $S=2.6$ 이하이면 $\alpha=1.0$ 에 해당하는 근사값을 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 즉 이것은 쉘형좌굴을 발생시키는 영역으로 복잡한 프레임 해석을 하지 않고 간단히 Yamada의 연속체치환해석법에 의해서도 간단하게 좌굴내력을 파악할 수 있는 돔의 형상 영역이다. 실무에서는 돔의 형상을 결정할 때, 복잡한 프레임 해석을 반복하지 않고도 간단한 연속체치환해석을 반복 계산하여 좌굴내력과 좌굴모드 등을 파악할 수 있으므로 초기 설계시 많은 시간과 비용을 절약할 수 있다.

3.2 형상계수 S 와 좌굴내력 관계 검토

<Fig. 2> Relation curve of S and buckling strength

<Fig. 2>는 $S -$ 좌굴내력 관계곡선을 나타낸다. 그림에서 H-Section_1과 _2는 각각 약축보강유와 약축보강무의 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 단면형상에 관계없이 전 모델 공히 S 값이 작을수록 좌굴내력값이 커지며, H형강의 경우 단면보강이 없을 경우 좌굴내력값이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 바꾸어 말하면, H형강의 경우 실무에서는 약

<Fig. 3> Relation curve of S and buckling strength (α)

한편, $S=2.6$ 이상인 S 영역에서는 α 값이 1보다 작은 값을 나타내며, 이는 Q_{cr} 값이 Q_{cy} 값보다 작은 것을 의미하며, 이는 좌굴모드 뿐만 아니라 좌굴내력면에서도 연속체셀에서는 찾아볼 수 없는 단층래티스돔 고유의 좌굴특성을 나타내고 있음을 의미한다. 이에 대한 연구는 Yamada 등에 의해 행해져 이미 많은 연구 데이터가 축적되어 있다¹⁻⁶⁾.

H형강 약축보강유의 경우, $S=2.4$ 이하이면 $\alpha=1.0$ 에 해당하는 값을 나타내고 있으며, 원형강관의 경우보다 S 값이 더 작은 돔의 형상범위에서 쉘형좌굴을 발생시키는 것을 알 수 있다. 특히 $S=2.4$ 의 경우는 좌굴내력은 $\alpha=1.02$ 로서 연속체셀형 좌굴내력값을 가지고 있으나, 좌굴모드는 부재좌굴 모드를 나타내고 있다. 이 현상은 미루어 짐작해볼 때 $S=2.4$ 범위에 있는 단층래티스 돔 형상은 연속체 셀과 이산체 래티스돔의 특성을 전부 가지고 있음을 의미한다. 즉 연속체셀 특성과 이산체 래티스 돔 특성을 구분하는 경계형상계수값으로 표현할 수 있을 것이다.

경계형상계수값보다 큰 S 의 범위에서는 부재좌굴을 발생시키며, 좌굴내력비의 경향은 원형강관의 경우와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

H형강 약축보강무의 경우, 본 연구에서 도입한 형상계수 S 의 전 범위에서 부재좌굴이 발생하며, 좌굴내력비의 경향은 원형강관 및 H형강 약축보강유의 경우와 유사하지만 그 크기는 많은 차이를 나타내고 있다. 약축보강이 없는 전 모델의 경우, 압축재에서 부재좌굴이 발생하여 단층래티스 돔 구조물 전체의 좌굴내력을 저하시키는 원인으로 작용한다. 따라서 실무에서는 반드시 압축재의 약축 단면을 보강하던가 또는 약축방향으로의 좌굴길이를 줄여 줌으로 인하여 부재 세장비를 작게 할 수 있고, 결국은 구조물 전체의 좌굴내력을 크게 하는 효과를 가져올 수가 있는 것이다.

3.3 좌굴전 하중-변위 관계 곡선

<Fig. 4> Curve of load and displacement before buckling at the peak of the dome (H-shaped steel section with reinforcement)

<Fig. 5> Curve of load and displacement before buckling at the peak of the dome (H-shaped steel section without reinforcement)

<Fig. 4> ~ <Fig. 5>는 각각 H형강 대표적 모델의 경우 약축 보강유와 보강무에 대한 단층래티스 돔의 정점에서의 하중-변위 관계곡선을 나타낸다.

<Fig. 4> ~ <Fig. 5>에서 H-200은 모델명을 나타낸다. H형강-보강유의 모델에서 좌굴직전 돔의 정점에서의 연직하방향 변위는 H-400의 경우 약 150mm, H-300의 경우 약 104mm, H-200의 경우 52mm를 나타낸다.

한편 H형강-보강무의 모델에서 좌굴직전 돔의 정점에서의 연직하방향 변위는 H-400의 경우 약 68 mm, H-300의 경우 약 45mm, H-200의 경우 24mm를 나타낸다. 좌굴 전까지 정점에서의 하중-변위 관계는 전 모델에서 기하학적 비선형성을 나타내고 있다.

3.4 좌굴모드(Buckling Mode)

<Fig. 6> ~ <Fig. 8>은 대표적 모델의 좌굴모드를 2차원으로 나타낸 것이며, 마크는 좌굴위치이다.

<Fig. 6>에서는 S 값이 2.5 이하이면 쉘형좌굴 즉, 전체좌굴, S 값이 2.6 이상이면 비셀형좌굴, 즉 부재좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다.

<Fig. 7>에서는 S 값이 2.2 이하이면 쉘형좌굴 즉, 전체좌굴, S 값이 2.4 이상이면 비셀형좌굴, 즉 부재좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다.

<Fig. 8>에서는 S 값이 2.0 이상인 전 모델에서 비셀형좌굴, 즉 부재좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다.

<Fig. 7> Buckling mode of representative model (H-shaped steel section, with reinforcement)

<Fig. 6> Buckling mode of representative model (circular hollow section)

<Fig. 8> Buckling mode of representative model (H-shaped steel section, without reinforcement)

그림에서 알 수 있는 것처럼 단층래티스 돔의 좌굴모드는 돔의 형상계수 S와 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있으며, 전 모델에서 간단하게 구할 수 있는 S값만으로 래티스 돔구조물의 좌굴특성, 특히 좌굴모드를 추정할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내의 기성 원형강관과 H형강을 주 골조로 사용하는 단층래티스 돔에 대하여 각 각 8개의 대표적 형상모델에 대한 좌굴하중과 좌굴모드를 구하였으며, 형상계수 S에 따른 좌굴특성을 비교 분석한 결과 아래의 결론을 얻었다.

1) 단층래티스 돔의 사용부재 단면종류에 따른 좌굴특성을 구하였으며, 단면종류와 보강유무에 따라 좌굴특성에 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

2) 단층래티스 돔의 형상계수 S값에 따른 좌굴특성은 사용부재 단면종류 및 부재보강 유무에 따라 다소 차이가 있었지만, S로서 체계적인 좌굴하중과 좌굴모드를 유추할 수 있는 데이터를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 경동대학교 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Yamada M., An Approximation on the Buckling Analysis of Orthogonally Stiffened and Framed Spherical Shell, Shell and Spatial Structure Enginnering, IASS Symposium, Rio de Janerio, Pentech Press, pp.177-193, 1988.
2. Yamada, M. et al., "Theoretical and Experimental Study on the Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External pressure", Shell, Membranes & Space Frame, Preceedings of the IASS Symposium, Osaka, 1986, pp 113-120
3. Yamada, M. and Ishikawa, T. : Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External Pressure, Proceedings of the International Colloquium on Space Structures for Sports Buildings, Beijing October 1987, SPACE STRUCTURES FOR SPORTS BUILDINGS, Elsevier, London, U.K., 1987, pp. 353-360
4. Architectural Institute of Japan, STABILITY OF SINGLE LAYER LATTICED DOMES STATE-OF-THE-ART, edited by Heki, K. August, 1989, pp. 191-254.
5. Yamada, M., Uchiyama, K., Yamada, S. and Ishikawa, T. : Theoretical and Experimental Study on the Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External pressure, Preceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka September, 1986, vol.3, SHELLS, MEMBRANES & SPACE STRUCTURES, Elsevier, Tokyo, Japan, 1986, pp. 113-120.
6. M. Yamada, Wang Li, A. Yamamoto, Buckling of Single-Layer Latticed Domes with Triangular Network, Processing of the Third Summer Colloquium on Shell and Spatial Structures, August 1990.
7. Heki, K.: On the Effective Rigidities of Lattice Plates, RECENT RESEARCHES OF STRUCTURAL MECHANICS -Contributions in Honour of the 60th Birthday of Prof. Tsubio, Unosheten, Tokyo, 4.1968, pp.31-46
8. Kim, Cheol-Hwan, Suk, Chang-Mok and Jung, Hwan-Mok, The Buckling Characteristics of Single-Layer Lam Domes according to Support Position under Construction, Journal of the Korea Association for Spatial Structures, Vol.10, No.4, 2010.12, pp.67~74
9. Koo, Choong-M0, Jung, Hwan-Mok and Kim and Cheol-Hwan, A Study on the Stability of the Single-Layer Latticed Dome during Erection Using the Step-Up Method, Journal of the Korea Association for Spatial Structures, Vol.12, No.4, 2012.12, pp.109~118

(접 수 일 자 : 2013년 11월 01일)

(심사완료일자 : 2013년 11월 19일)

(게재확정일자 : 2013년 11월 22일)