Journal of the Korean Association for Spatial Structures
Vol. 10, No. 4 (통권 42호), pp.67~74, December, 2010

단층라멜라 돔의 시공 중 서포트 위치에 따른 좌굴특성

The Buckling Characteristics of Single-Layer Lamella Domes according to Support Position under Construction

김 철 환* 석 창 목** 정 환 목***
Kim, Cheol-Hwan Suk, Chang-Mok Jung, Hwan-Mok

요 약

대공간 구조형식을 갖는 단층 래티스 돔은 역학성, 기능성, 심미성 등을 갖는 구조물로서 그 용도가 점점 확대되고 있다. 단층 래티스 돔의 골조 격자 패턴은 무수히 존재하며, 그 대표적인 패턴에는 삼각형, 사각형, 육각형, 라멜라형, 리브형 등이 있다. 대공간 구조물의 경우, 일반구조물과 달리 재래적인 공법으로 지붕 골조를 시공할 경우 많은 가설재가 소요됨으로 시공비 증가가 예상된다. 따라서 대공간 구조물의 지붕 골조 설치는 특수 Erection 공법에 의하는 것이 일반적이며, 그 중 지상에서 지붕골조를 설치 후 jack-up 서포트에 의해 골조를 인양하는 Step-Up 공법을 적용할 경우 공기와 공비의 대폭적인 절감이 예상된다. 따라서 본 논문의 목적은 Step-Up 공법에 의해 단층라멜라 돔의 지붕골조를 시공할 경우, 인양 중 가설 서포트 개수와 위치에 따른 좌굴특성을 검토하는 것이다. 연구 결과 서포트 개수 및 위치에 따른 단층라멜라 돔의 다양한 좌굴 특성에 관한 실무자를 위한 기초적인 자료를 얻을 수 있었다.

Abstract

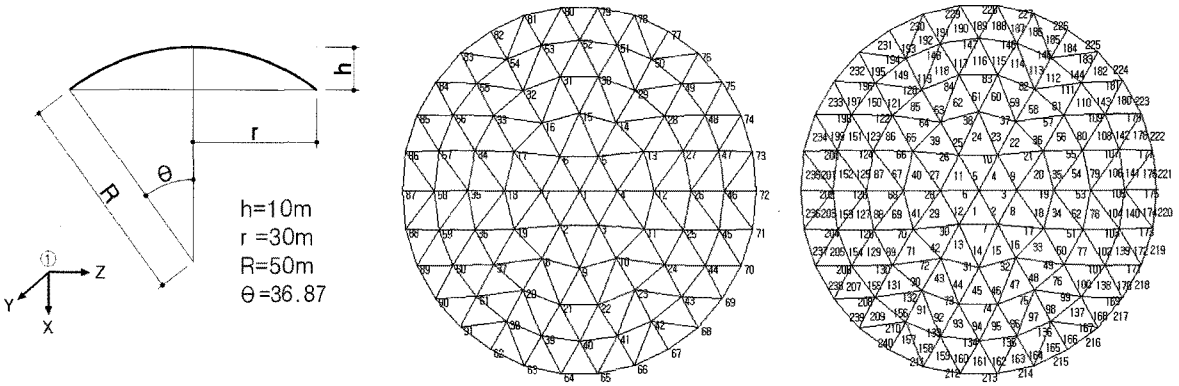
Single layer latticed domes which have a mechanics property, a functional property, a aesthetic property and so on, occupies one part of long span space structures and after this, the using parts will be extended. The frame network pattern of single-layer latticed domes can be infinitely taken into account. The typical network patterns are triangular, square, hexagon, lamella and rib etc. It would take long time and cost too much to erect large roof structures with traditional erection techniques due to require of large number of temporary bracing and supports. The erection of large roof structures requires special techniques. As one of these special techniques is the Step-Up election method that utilizes jack-up supports and this will extremely saves time and cost to erect large roof structures. The objective of this study is to analysis the buckling characteristics of single-layer lamella domes according to the support number and position. From the result of this study, we obtained the fundamental data for the structural engineers who design the temporary support of large roof structures.

키워드 : 단층라멜라 돔, Step-Up Erection 공법, 서포트 위치, 좌굴특성
Keywords : Single-layer Lamella Dome, Step-Up Erection Method, Support Position, Buckling Characteristic

1. 서 론

대공간 구조물에는 연속체 쉘 구조물, 스페이스 프레임 구조물, 막 구조물 그리고 케이블 구조물 등이 있으며, 현재 전 세계적으로 대공간 구조물의 수요가 점점 증가하고 있는 추세이다. 대공간 구조물은 상부구조와 하부구조로 크게 대별되며, 하부구조는 철골 및 RC 라멘조가 대부분으로 그 시공법은 일반 구조물의 시공법에 준하면 될 것이다. 그러나 상부 지붕구조의 경우 지점간 거리가 장대하기 때문에 일반구조물과 달리 재래적인 공법으로 지붕 골조를 시공할 경우 많은 가설재가 소요됨으로 시공비 증가와 공사비용 증가뿐 아니라 시공안전성 확보에도 많은 어려움이 따른다. 따라서 대공간 구조물의 지붕 골조 설치는 특수 Erection 공법에 의하는 것이 일반적이며, 이미 알려진 대공간 구조물

* 경북대학교 건축도시환경공학부 교수(교신저자)
Tel: 054-530-1374 Fax:054-530-1379
E-mail : chk@knu.ac.kr
** 경북대학교 건축도시환경공학부 외래교수
*** 경동대학교 건축토목공학부 교수



(a) 대표적 모델 형상(h=10m) (b) 절점번호 (c) 부재번호

〈그림 1〉 해석모델 형상 및 네트워크 패턴

의 상부 지붕골조 설치공법은 Element 공법, Block 공법, Sliding 공법, Lift-Up 공법, Push-Up 공법 등이 있다.[1] 이 공법 외에 지상에서 지붕골조를 설치 후 jack-up 서포트에 의해 골조를 인양하는 Step-Up 공법[2]으로 불리는 시공자동화공법이 국토해양부 연구비 지원으로 저자 등에 의해 개발되어 있으며 이 공법을 적용할 경우 시공안전성 확보는 물론 공기와 공비의 대폭적인 절감이 예상된다.

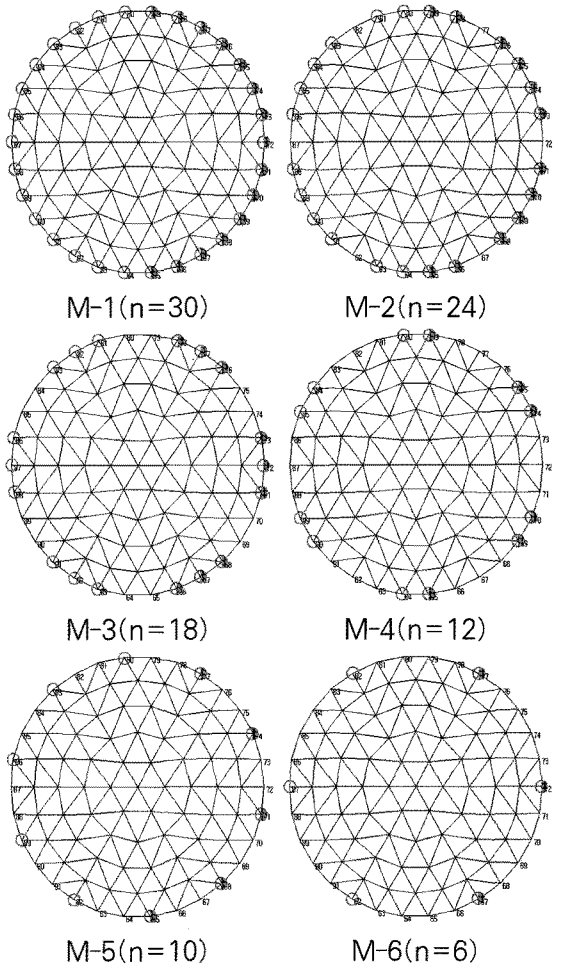
그러나 이 공법은 아직 시공사례가 없으며, 특히 시공 중 가설 서포트 개수와 위치에 따른 상부골조의 안전성이 검증되고 있지 않다.

따라서 본 논문의 목적은 Step-Up 공법에 의해 단층라멜라 돔의 지붕골조를 인양할 경우 서포트 개수와 위치에 따른 상부구조의 좌굴특성을 검토하는 것이다.

2. 해석모델

2.1 형상모델

<그림 1>은 해석모델의 형상과 네트워크 패턴을 나타내고, (a), (b), (c)는 각각 해석대상 돔의 모델형상 그리고 절점번호와 부재번호를 나타낸다. 해석에 사용된 라멜라 돔은 정점에서 경계부 지점까지 경선방향 분할수가 5분할이다. 모델별 저면직경은 60m로 동일하며, 라이즈-스팬비에 따른 좌굴특성을 고려하기 위하여 정점높이 h=10m, 15m, 20m, 30m의 4종류 모델을 선정하였다. <그림 2>는 해석모델별 서포트 위치를 나타낸다. M-1은 30개소, M-2는 24개소, M-3은 18개소, M-4는 10개소 그리고 M-6은 6개소에 서포트를 설치하였다. 모든 모델 동일하게 X축을 중심으로 좌우대칭으로 서포트를 설치하였다.



〈그림 2〉 해석모델별 서포트 위치

〈표 1〉 해석모델의 기본제원

모델명	n	α h(m)	λ S	L(cm) R(cm)	비고
10M-1	30				<기타조건> *사용부재: φ355.6×8.0 *영계수 E: 205,000(N/㎟) *프와송비 ν: 0.3 *지점조건 : 회전, 이동 <기호설명 > n:지점수 α:라이즈-스팬비 h:돔정점높이 λ:세장비 S:돔형상계수 L:대표부재길이 R:곡률반경
10M-2	24				
10M-3	18	0.3	52.39	644	
10M-4	12	10	2.452	500	
10M-5	10				
10M-6	6				
15M-1	30				
15M-2	24				
15M-3	18	0.5	56.54	695	
15M-4	12	15	3.060	375	
15M-5	10				
15M-6	6				
20M-1	30				
20M-2	24				
20M-3	18	0.6	62.15	764	
20M-4	12	20	3.612	325	
20M-5	10				
20M-6	6				
30M-1	30				
30M-2	24				
30M-3	18	1.0	76.63	942	
30M-4	12	30	4.636	300	
30M-5	10				
30M-6	6				

지점조건은 시공 중 슬라이딩 효과를 고려하지 않은 회전지점의 조건과 슬라이딩 효과를 고려한 이동지점의 조건으로 하였다. 슬라이딩 효과를 고려할 경우, Z축의 양(+)의 방향 지점은 회전지점으로, 반대로 음(-)의 방향 지점은 이동지점으로 모델링 하였다.

<표 1>은 해석모델의 기본제원을 나타낸다. 사용부재, 추가 제원 및 기호설명은 표의 비고란에 나타낸다. 한편 래티스돔의 형상계수 S는 래티스돔의 전체좌굴과 부재좌굴을 구분하기 위해 Yamada에 의해 제안[3]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 면외 휨강성, K는 면내 축강성을 나타낸다. 선행연구[3-6]에 의하면 3방향 그리드 돔의 경우 좌굴형태는 S가 작을수록 절점을 중심으로 전체좌굴이 발생하며, S가 클수록 압축부재가 좌굴하는 부재좌굴이 발생하는 것이 보고되고 있다.

2.2 해석방법

해석방법은 3차원 공간을 구성하고 있는 프레임을 기하학적 비선형성을 고려하는 유한요소법에 의해 정식화했으며[3-5,7], 하중은 연직하중이 작용하고 1부재 1요소로 모델링하여 검토한다. 즉 해석의 간편을 위해 부재요소에는 자유도를 두지 않음으로 인하여 본 연구에서는 전체좌굴과 절점좌굴에 대한 검토를 할 수 있으며, 부재좌굴에 대한 검토는 차후의 연구로 미루고자 한다.

수치계산은 최대변위증분을 갖는 절점변위에 관한 증분법을 적용하고, 각 증분단계에서 강성행렬의 행렬식을 계산하여서 분기점을 구한다. 또한 이 분기점에서 고유치 해석을 행하여 이 고유벡터로부터 분기좌굴모드를 구한다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 좌굴특성

<표 2>는 각 모델에 대한 해석결과를 나타낸다. Qcr은 각 모델의 좌굴내력, q'는 높이별 각 모델의 좌굴내력을 해당높이 모델M-1의 좌굴내력을 기준값으로 무차원하여 나타낸 것이다. NODb는 좌굴 절점번호, Nmax는 좌굴직전 부재의 최대 축력크기, ELEMn은 Nmax가 발생하는 절점을 나타낸다. 또한 좌굴직전 X방향, Y방향, Z방향의 최대변위는 Umax, Vmax, Wmax로 나타내며, 최대변위가 발생한 절점을 NODu, NODv, NODw로 각각 나타낸다.

<그림 3>은 각 모델별 좌굴내력을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전 모델 공히 서포트 수를 감소할수록 좌굴내력은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

특히, 라이즈-스팬비 0.3인 경우 서포트 수를 60% 감소시킨 10M-4모델의 경우 10M-1과의 좌굴내력비 q'가 0.86정도로 서포트 수의 60%이하의 감소에 따른 좌굴내력의 저하는 크지 않음을 알 수 있다.

라이즈-스팬비 0.5와 0.6의 경우 서포트 수를 40% 이상 감소시킨 M-3모델은 돔의 형상에 의한 슬라이딩 효과의 증가로 좌굴내력이 감소함을 알 수 있으며, 두 경우 라이즈-스팬비별 좌굴내력 감소는 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

라이즈-스팬비 1.0의 경우 전체 모델에서 좌굴내

<표 2> 해석결과

α H(m)	Model	Qcr (N/㎜)	q′	NODb	Nmax (kN)	ELEMn	Umax (㎜)	NODu	Vmax (㎜)	NODv	Wmax (㎜)	NODw
0.3 10	10M-1	26.84	1.00	10, 14	24.68	234, 237	249.51	62, 82	1354.37	58	432.38	86, 88
	10M-2	26.86	1.00	10, 14	22.17	234, 237	235.01	83, 91	887.25	58	430.09	86, 88
	10M-3	24.27	0.90	23, 29 41, 51	19.81	234, 237	270.60	62, 82	771.37	35	499.15	87
	10M-4	23.17	0.86	22, 30	17.47	135, 146	271.82	62, 82	1177.66	87	454.16	85, 89
	10M-5	18.59	0.69	50	18.72	184	272.33	80	653.72	35	416.56	86
	10M-6	15.10	0.56	65, 79	19.87	166, 184	751.22	65, 79	1797.53	65, 79	694.46	87
0.5 15	15M-1	22.08	1.00	2, 6	23.37	234, 237	268.98	62, 82	559.66	7	477.46	87
	15M-2	21.49	0.97	22, 30	22.33	235, 236	256.37	63, 81	577.86	7	473.34	86, 88
	15M-3	14.50	0.66	64, 80	15.46	164, 186	388.61	65, 79	578.17	84, 90	501.43	87
	15M-4	12.14	0.55	82	14.70	135, 146	687.07	62, 82	1269.11	87	609.33	87
	15M-5	10.82	0.49	64	18.00	184	327.16	80	530.24	78	476.24	86
	15M-6	6.88	0.31	64, 80	18.38	166, 184	1326.38	65, 79	1785.83	65, 79	1034.59	87
0.6 20	20M-1	14.73	1.00	87	17.02	234, 237	204.96	62, 82	429.05	7	347.20	87
	20M-2	14.50	0.98	87	17.15	235, 236	225.05	63, 81	449.07	7	379.68	86, 88
	20M-3	9.05	0.61	64, 80	14.01	164, 186	532.95	65, 79	488.82	84, 90	481.48	87
	20M-4	6.64	0.45	62, 82	11.81	163, 187	865.63	62, 82	1023.20	87	892.57	87
	20M-5	6.86	0.47	64	16.29	184	435.25	78	436.47	78	503.90	86
	20M-6	3.71	0.25	80	16.18	166, 184	1501.14	65, 79	1368.99	65, 79	1274.56	87
1.0 30	30M-1	6.03	1.00	62, 82	9.11	135, 146	132.24	40, 52	290.81	1	133.26	57, 59
	30M-2	5.76	0.96	62, 82	8.98	135, 146	170.36	62, 82	289.02	7	184.10	87
	30M-3	4.47	0.74	64, 80	10.60	164, 186	482.87	65, 79	269.04	7	379.43	87
	30M-4	3.96	0.66	62, 82	9.41	135, 146	968.96	62, 82	443.87	87	1126.12	87
	30M-5	3.39	0.56	63	11.23	184	370.15	80	229.06	7	379.63	89
	30M-6	1.66	0.28	65, 79	11.44	166, 184	1180.40	65, 79	547.47	84, 90	1286.07	87

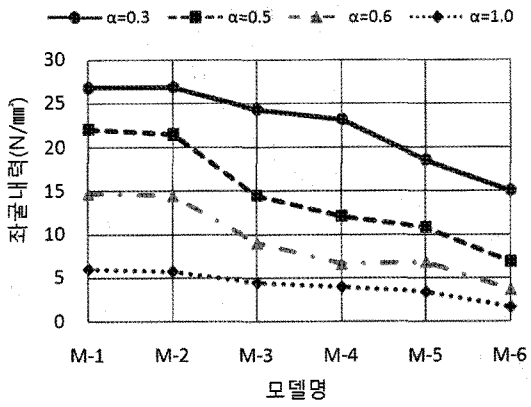
α : 라이즈-스팬비, H : 돔의 높이(m)
Qcr : 각 모델의 좌굴내력(N/㎜)
Nmax : 좌굴직전 부재의 최대인장력 및 압축력 크기(kN)
Umax : 좌굴직전 X방향의 최대변위(㎜)
Vmax : 좌굴직전 Y방향의 최대변위(㎜)
Wmax : 좌굴직전 Z방향의 최대변위(㎜)
q′ : 높이별 (각 모델의 좌굴내력)/(M-1의 좌굴내력) 비
NODb : 좌굴 발생 절점번호
ELEMn : Nmax가 발생하는 부재번호
NODu : Umax가 발생하는 절점번호
NODv : Vmax가 발생하는 절점번호
NODw : Wmax가 발생하는 절점번호

력이 작은 값을 보이는 것은 돔의 형상에 의한 슬라이딩 효과의 증대와 동일한 조건의 그리드형상에 따른 부재길이의 증가에 의한 것으로 사료된다.

3.2 거동특성

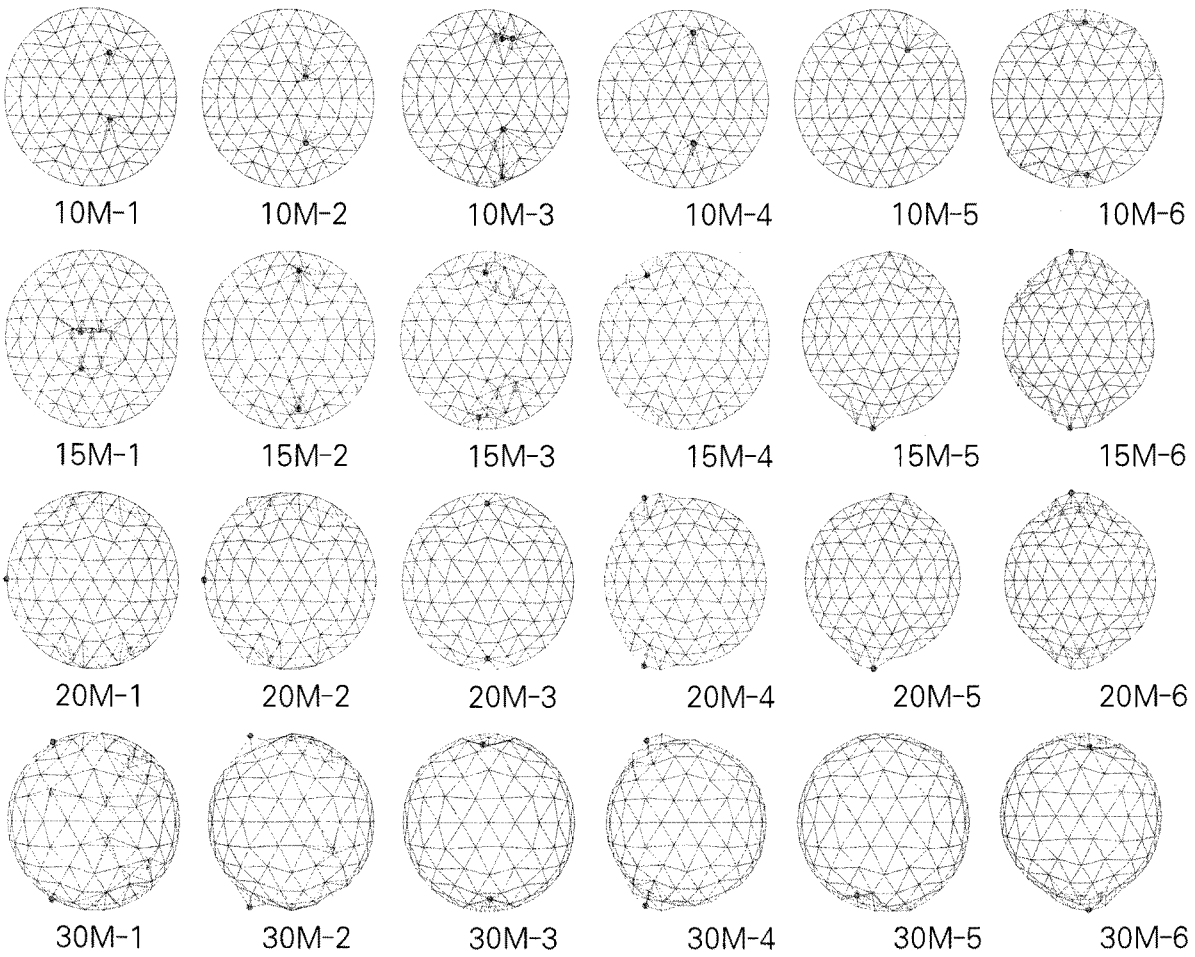
<그림 4>는 해석모델별 좌굴모드와 좌굴이 발생한 절점을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 M-5모델은 Z축을 중심으로 역대칭의 좌굴형태를 나타내며, 그 외의 모델들은 Z축을 중심으로 대칭적인 좌굴형태를 나타낸다.

라이즈-스팬비가 증가할수록 그리고 서포트 수가 감소할수록 저면경계부에서 좌굴이 발생하였다.



〈그림 3〉 해석모델별 좌굴내력

즉, 10M-6, 15M-5, 15M-6모델 그리고 정점높이 h=20m와 h=30m 전체 모델이 경계부에서 좌굴이



〈그림 4〉 해석모델별 좌굴모드 및 좌굴절점

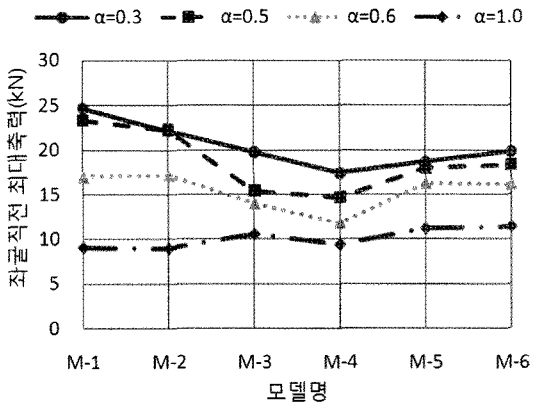
발생하였다. 이는 서포트 수의 감소와 라이즈-스팬비의 증가에 따른 슬라이딩 효과에 의한 것임을 알 수 있다.

10M-3의 경우 23, 29, 41, 51번 절점에서 전체좌굴이 발생하였으며, 10M-5의 경우 50번 절점에서, 15M-5와 20M-5는 64번 절점에서 30M-5는 63번 절점에서 좌굴이 일어났다.

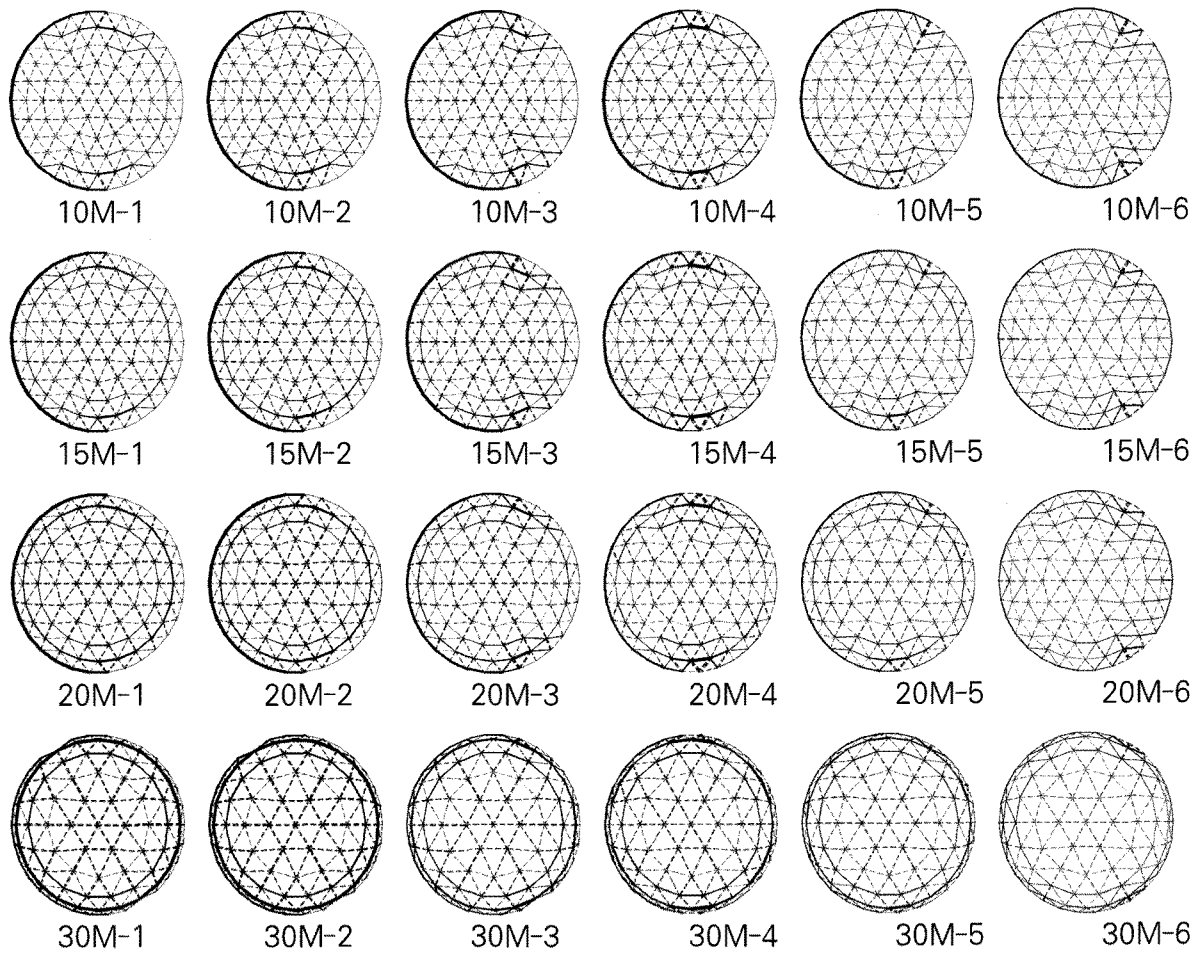
M-5모델들이 라이즈-스팬비에 상관없이 한 절점에서만 좌굴이 발생한 것은 다른 모델들에 비해 서포트 위치가 X축에 대해서 역대칭 형태로 지지되었기 때문이다.

3.3 부재력 및 변위 특성

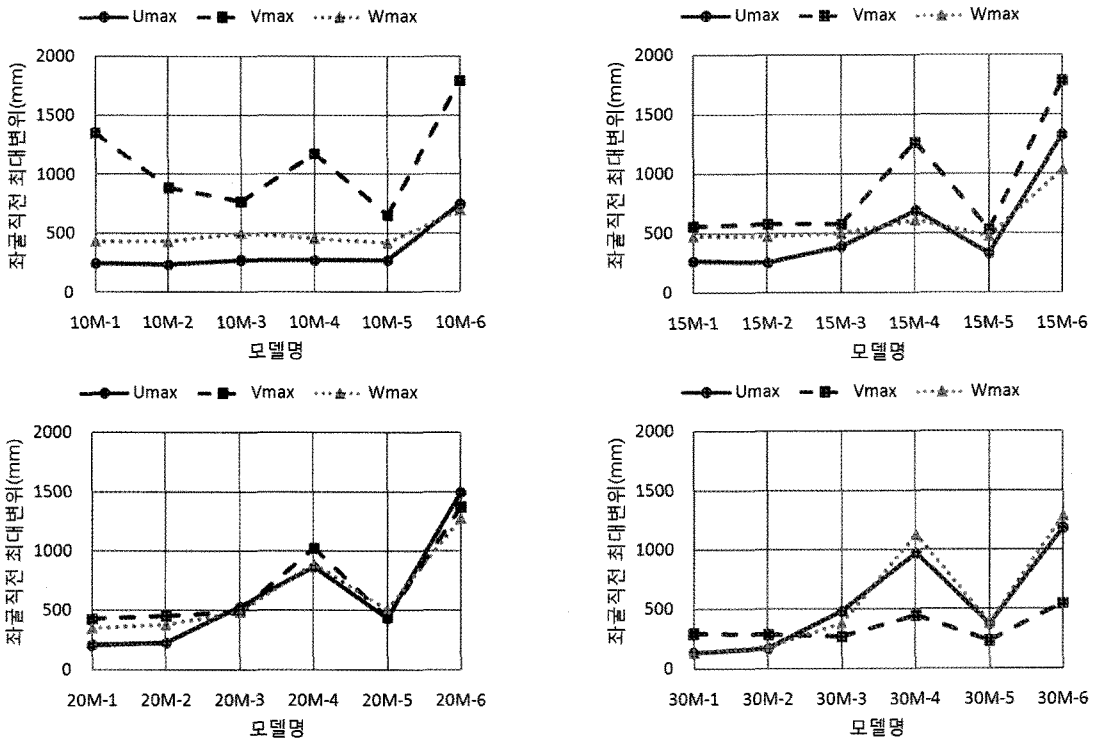
<그림 5>는 좌굴직전 최대축력값을 나타낸다. 라이즈-스팬비가 증가할수록 최대축력값은 감소한다. 라이즈-스팬비 0.6이하의 모델에서는 서포트 수를 60%감소시킨 M-4모델까지 서포트 수의 감소에 따라 최대축력값이 감소하나 M-5, M-6모델에서는 축력값이 증가한다. 라이즈-스팬비 0.3의 경우 M-1, M-2, M-3, M-4 모델은 서포트 수 감소에 따른 좌굴내력의 저하보다 축력값의 감소가 현저하다.



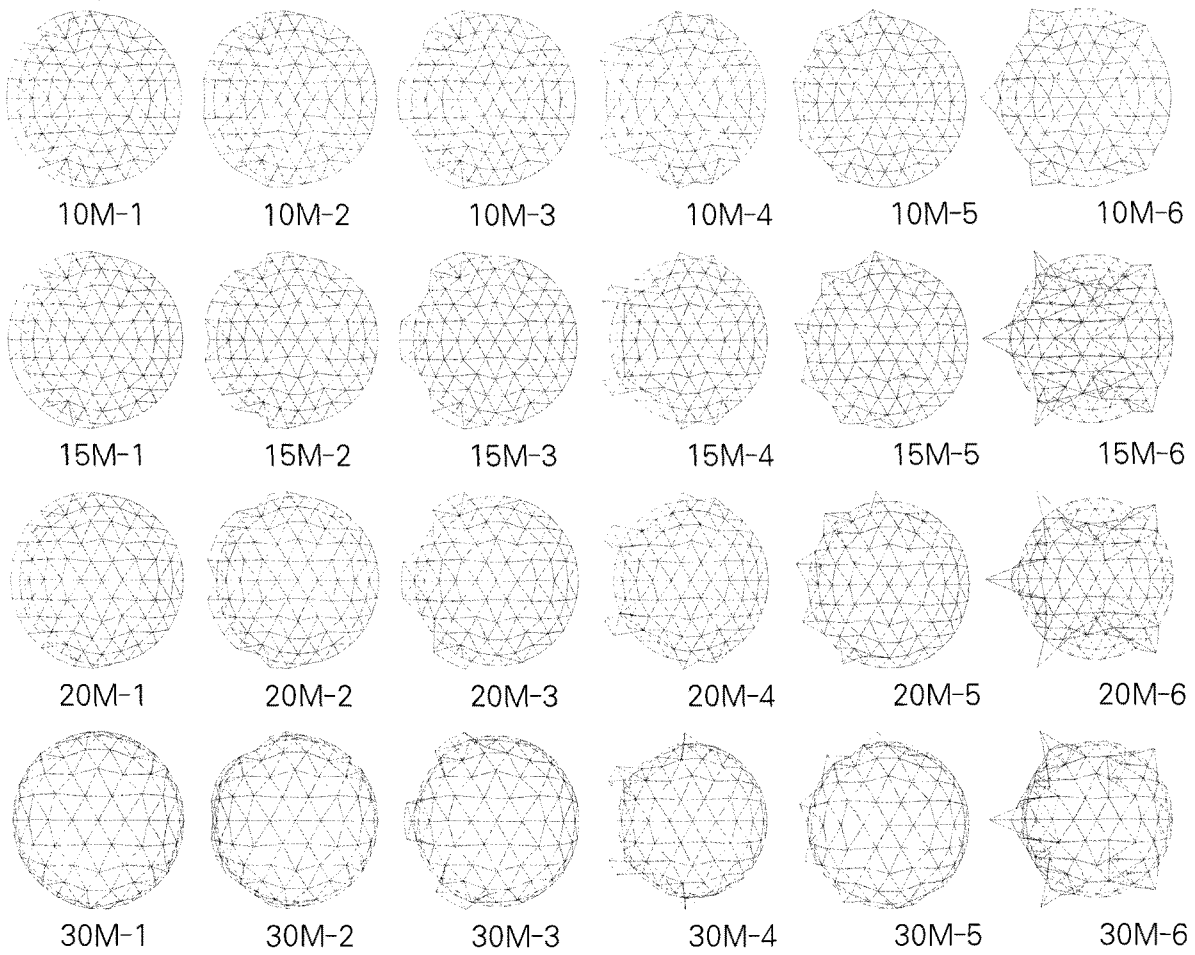
〈그림 5〉 좌굴직전 최대축력



〈그림 6〉해석모델별 축력도(—인장, ---압축)



〈그림 7〉 좌굴직전 최대변위



〈그림 8〉 해석모델별 변형도

라이즈-스팬비 1.0의 경우는 돔의 기하학적 형상에 의해서 서포트 수의 감소에 따른 좌굴직전 최대 축력값의 변화가 미소함을 알 수 있다.

<그림 6>은 해석모델별 좌굴직전 축력도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 이동지점으로 지지된 저면부분에서 큰 인장력의 분포를 나타내고, 서포트 수를 감소시킬수록 이동지점 옆의 핀지점 부근 경선방향 부재에서 큰 압축력을 나타내고 있다.

라이즈-스팬비가 증가할수록 원주방향 저면부분에서는 큰 인장력을 경선방향 중앙부분에서는 큰 압축력의 분포를 나타낸다.

<그림 7>은 좌굴직전 각 방향의 최대변위를 나타내고, <그림 8>는 해석모델별 변형도를 나타낸다.

라이즈-스팬비가 증가할수록 Y방향 최대변위 Vmax의 값은 감소하며, 라이즈-스팬비가 높을수록 서포트 수의 감소에 따라 Umax와 Wmax가 증가한다. 특히 라이즈-스팬비가 증가할수록 M-4모델의 Z방향 최대변위 Wmax는 크게 증가함을 알 수 있다.

라이즈-스팬비가 0.3의 경우 최대변위는 Y방향, Z방향, X방향 순으로 큰 값을 보이며, 서포트 수에 관계없이 Vmax가 큰 값을 나타낸다. 또한 서포트 수의 변화에 따른 X, Z방향의 최대변위 Umax, Wmax의 변화는 10M-6모델을 제외하곤 미소하다.

그러나 라이즈-스팬비 1.0의 경우 돔의 기하학적 형태에 의해 서포트 수의 감소에 따라 Umax와 Wmax가 높은 값을 나타내고 있다.

라이즈-스팬비에 관계없이 M-4, M-6모델의 변위값이 높게 나타나는 것은 M-4모델의 경우는 저면부 서포트가 불균등하게 분포되었기 때문이며, M-6모델의 경우는 서포트의 개수가 적으므로 다른 모델에 비해 큰 변형을 일으키기 때문이다.

모델별 변형도를 살펴보면 라이즈-스팬비가 낮을

수록, 서포트 개수가 적을수록 그리고 서포트 위치가 불규칙할수록 변형이 크다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 Step-Up 공법에 의해 단층라멜라 돔의 지붕골조를 인양할 경우 서포트 개수와 위치에 따른 좌굴내력을 서로 비교, 검토하여 실무자에게 기초적 자료를 제공하는 것을 연구의 주목적으로 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 돔의 라이즈-스팬비에 상관없이 서포트 개수를 줄일수록 좌굴내력은 감소함을 알 수 있었으며, 이 감소 경향은 일반적인 상식의 범위를 벗어나지 않았다.

(2) 좌굴모드는 라이즈-스팬비가 작을 경우 절점군을 중심으로 한 전체좌굴이 발생하였으나, 라이즈-스팬비가 크거나 서포트 개수가 줄어들수록 경계부에 인접한 1개 절점에서 국부적인 절점좌굴의 경향을 보였다.

특히, 전체좌굴과 달리 절점좌굴이 발생하는 경우에는 좌굴내력값에 의존하여 시공 중 구조안전성을 판단하기 전에 변형모드 등을 병행 검토하여 구조안전성을 판단할 필요가 있다.

(3) 전 모델 공히 최대인장력이 발생하는 위치는 돔의 저면부 원주방향 부재에서 발생하였으며, 최대압축력은 서포트 부근 경선방향의 부재에서 발생하였다.

(4) 본 연구에서는 가설 서포트 개수와 위치에 따른 시공 중 지붕골조의 거시적 관점에서의 좌굴경향을 검토한 것이며, 차후 해석의 자유도를 높여 부재좌굴, 절점좌굴 등에 대한 추가 연구가 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. 정환목, 이성연, 지석원, "대공간 건축물 Erection 공법에 관한 사례 조사 연구", 한국공간구조학회지, 제7권 제2호, 2007년 4월, pp. 97-104
2. 경동대학교 산학협력단, "시공 자동화 공법 개발", 국토해양부 건설핵심기술연구개발사업 위탁연구 제3차년도 보고서, 2009년 6월
3. 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
4. Jung, H. M et al., "A Study on Buckling Charac-teristics of Single-Layer Latticed Domes with Triangular Network", Second Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Sydney, 8. 1993
5. M. Yamada, "An Approximation on the Buckling Analysis of Orthogonally Stiffened and Framed Spherical Shell", Shell and Spatial Structure Engineering, IASS Symposium, Rio de Janerio, Pentech Press, 1988, pp.177-193
6. Y. Hangai, "Architectural Institute of Japan. Stability of Sing-layer Latticed Domes State-of-the-art", edited by K. Heki, August, 1989, pp.121-254
7. 권영환, "삼각형 네트워크를 갖는 단층 래티스 돔의 좌굴특성에 관한 연구", 공학박사학위논문, 부산대학교 대학원 건축공학과, 1993

▶접수일자 : 2010년 4월 23일
▶심사 완료일자 : 2010년 10월 13일
▶게재 확정일자 : 2010년 10월 15일