

라이즈비에 따른 단층 및 복층 레티스 돔의 좌굴특성에 관한 비교연구

A Comparative Study on the Buckling Characteristics of Single-layer and Double-layer Lattice Dome According to Rise ratio

권영환* 정환목** 석창목*** 박상훈****
Kwon, Young-Hwan Jung, Hwan-Mok Suk, Chang-Mok Park, Sang-Hoon

ABSTRACT

In the latticed domes which is a set of space frame, buckling is derived if the external force reaches a limitation by the lightness of the material and the minimization of the member section area. these are concerned with a geometric shape, network pattern, the number of layer, and so on. Most of all, the number of layer of the lattice dome is a important factor from the viewpoint of initial and structure design.

Therefore this study compared buckling characteristics of single-layer with double-layer latticed domes and investigated the relativity of buckling-stress-ratio and member-density-ratio according to rise ratio to improve that designers could extend the range of design selection

1. 서론

경제발전과 더불어 대규모 수용시설, 문화시설의 필요성이 대두되면서 대공간 구조물에 대한 관심은 높아지고 있다. 대공간 구조물의 구조시스템 중에서 스페이스 프레임은 많은 구조적 이점과 색다른 시각적 아름다움을 가지고 있지만, 외력이 어떠한 한계에 도달하면 좌굴⁽¹⁻⁵⁾이라는 불안정현상이 생긴다. 이런 좌굴현상은 레이어 수(단층과 복층)와도 밀접한 관련이 있는데, 구조설계자는 초기 디자인 및 구조설계 단계에서 명확한 결정을 내리지 못하는 경우가 많다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 선행연구^{(9),(10)}에서는 검토되지 않은 라이즈-스팬비조건^{(2),(3)}에 따라 단층과 복층의 좌굴특성을 비교·분석하고, 좌굴내력비와 부재밀도비와의 상관 관계⁽¹⁰⁾를 파악하여 좀 더 실용화를 위한 데이터를 얻고, 궁극적으로는 설계자로 하여금 디자인 선택의 폭을 넓혀주는 데 그 목적이 있다.

* 경북대학교 건축공학과 교수
** 대산건축구조연구소장 및 공학박사
*** 경북대학교 건축공학과 박사과정
**** 경북대학교 건축공학과 석사과정

2. 해석모델

2-1. 해석모델의 형상

본 논문의 해석모델은 개개 부재의 길이와 그 각이 일정하며, 역학적으로 매우 유리한 삼각형 격자패턴⁽³⁾을 갖는 원주방향으로 5분할된 단층 래티스 돔과 이와 동일한 공간을 형성하는 복층 래티스 돔으로 한다.

그림1은 본 연구에서 도입하는 단층 및 복층 래티스 돔의 형상으로 R1은 현재의 곡률반경, R0는 현재의 곡률반경, r은 저면반경, H는 래티스 돔의 높이, h는 상현재와 하현재의 y방향 층간거리로 저면반경의 4%로 산정하였다.

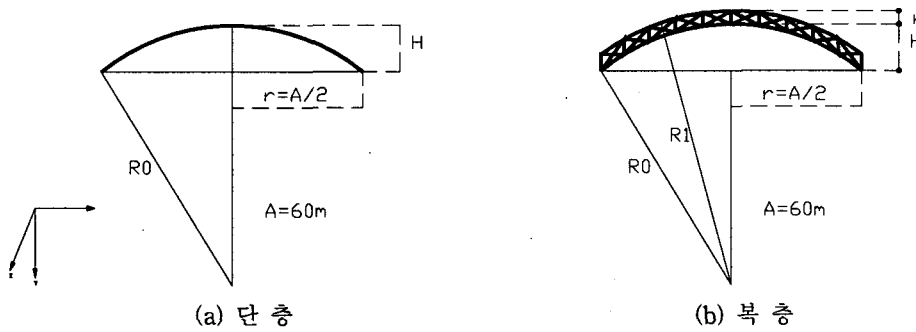


그림 1. 모델의 단면형상(H/r = 6/18)



그림 2. 모델의 3차원 형상

라이즈비에 따른 단·복층 래티스 돔의 비교를 위하여 저면반경에 대한 높이비 즉, 라이즈비(H/r)가 4/18, 5/18, 6/18, 7/18, 9/18, 10/18, 12/18인 7종류의 해석모델을 선정하였다. 표1에는 라이즈비에 따른 돔의 형상, 총 부재길이와 단층에 대한 복층의 부재밀도비(η) 등을 나타낸다. 그림2는 해석모델의 3차원 형상이다.

2-2. 부재제원







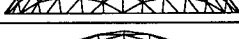
본 연구에서 도입하는 부재는 탄성계수 E가 2100t/cm², 프와송비 ν 가 0.3인 강관이며, 단층 및 복층에 사용되는 부재는 표2와 같다. 특히, 이 3개 단면을 선택한 이유는 표2에서 보여지는 바와 같이 동일모델에서 세장비의 크기에 따른 좌굴특성을 파악하기 위해서이다.

여기서, 세장비의 좌굴길이⁽³⁾는 분할된 네트워크의 부재길이가 반드시 일정하지 않아서, 주부재상의 임의의 한 부재길이(L)로 한다. 즉

$$L = 2 R0 \cdot \sin \frac{\varphi}{2N}$$

여기서, φ =반개각, N=분할수

표 1. 라이즈비에 따른 돔의 형상, 총 부재길이 및 부재밀도비

라이즈비	곡률반경(R0) (단위:m)	돔형상	총부재길이 (단위:m)		η
			단층	복층	
4/18	70.83		338.97	1407.63	4.153
5/18	58.17		343.21	1424.07	4.149
6/18	50.00		348.34	1443.96	4.145
7/18	44.40		354.30	1467.15	4.141
9/18	37.50		368.54	1522.66	4.132
10/18	35.33		376.68	1554.48	4.127
12/18	32.50		394.56	1624.51	4.117

η : 단층에 대한 복층의 부재밀도비

표 2. 부재제원 및 라이즈비에 따른 세장비

사용부재 라이즈비	$\phi - 310 \times 4.96$			$\phi - 250 \times 6.00$			$\phi - 180 \times 7.61$		
	A(cm ²)	I(cm ⁴)	i _e (cm)	A(cm ²)	I(cm ⁴)	i _e (cm)	A(cm ²)	I(cm ⁴)	i _e (cm)
	47.53	5530.0	10.8	45.99	3424.7	8.7	41.21	1534.0	6.1
4/18		57			71			102	
5/18		58			73			103	
6/18		60			74			106	
7/18		61			76			108	
9/18		64			80			114	
10/18		66			82			118	
12/18		71			88			125	

부재의 직경 및 두께단위 : (mm)

A : 단면적, I : 단면2차모멘트, i_e : 단면반경

3. 해석방법 및 해석상의 제조건

본 연구에서는 3차원 공간에서의 부재의 기하학적 비선형을 고려하는 유한요소법⁽³⁾에 의해 정식화한다. 또한 계산기의 용량 및 연산시간과 해석상의 정밀도를 고려하여 래티스 돔의 1/6영역을 해석대상으로 하고, 스페이스 프레임 고유의 부재좌굴 검토를 위하여 중간절점을 고려한 1부재 2요소로 해석한다.

도입하는 하중조건은 그림3와 같이 연직하중에 대해서 검토한다. 하중은 거의 3절점으로 둘러싸이는 3각형의 면적을 각 절점에 동일하게 배분하여 합한 면적의 크기로서 각 절점에 작용하는 것으로 한다. 다만, 중간절점에는 작용하중이 없는 것으로 한다. 그림4-①의 빗금친 부분은 한 부재에 있어 한절점(i절점)의 하중분담면적을 나타내며, 한절점(j절점)에 모이는 전부재에 대한 하중분담면적은 그림4-②의 빗금친 부분에 보이고 있다. 그리고, 해석영역의 경계상에 있는 절점에는 작용하중이 1/2로 되며, 정점에는 1/6로 된다. 경계상의 부재는 단면적 및 각 방향 단면2차모멘트를 1/2로 둔다.

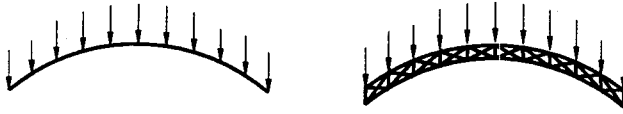


그림 3. 하중조건

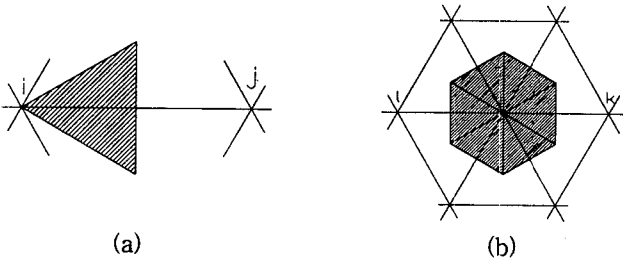


그림 4. 하중분담면적

접합부는 단·복층 공히 강접합이며, 정점의 경우 절점변위는 y방향(연직방향)의 절점변위만 자유이며 그외의 절점변위요소는 구속한다. 또한 대칭영역의 경계상의 절점변위와 돔의 원주방향 경계는 대칭조건을 만족하도록 구속한다.

4. 해석결과

그림5~그림7은 대표모델(ϕ -310 \times 4.96)의 라이즈비에 따른 좌굴모드(그림5), 변형모드(그림6), 부재축응력분포(그림7)를 나타낸다. 여기서, 점선은 돔의 형태를, 실선은 연직방향의 좌굴변위, 변형분포, 부재축응력 분포를 2차원으로 나타낸 것이다. 그림 중에 원으로 표시한 부분은 좌굴점, 최대변위점, 최대축력 발생부재를 나타낸다.

4-1. 좌굴모드

단층은 정점부근에서 좌굴이 발생하며, 동일한 라이즈비에 대해 단면반경이 큰 부재일수록 부재좌굴보다는 전체좌굴을 일으킨다. 한편, 복층은 해석모델에 따라 좌굴점의 위치가 다르나, 좌굴은 중앙부 부근(저면과 정점사이)이며 전 모델이 부재좌굴을 보인다. 부재좌굴의 경우에는 상현재의 부재에서 좌굴이 발생하고 있다.

4-2. 변형모드

단층은 그림6에서 알 수 있는 바와 같이 사용부재와 라이즈비에 관계없이 구조물의 정점부근에서 연직방향으로 최대 변위가 발생하고, 라이즈비에 따른 최대변위의 변화량이 극히 미비하다. 복층의 최대변위점은 사재와 현재에 걸쳐 불규칙적인 경향을 보이나 해석된 3종류의 부재가 라이즈비가 높을수록 변위량이 감소하며, 동일한 라이즈비에 대해 단면반경이 작을수록 변위량이 감소하는 경향을 보인다. 복층의 최대변위값이 단층의 최대변위값보다는 라이즈비의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

layer 라이즈비	단 층	복 층
4/18		
5/18		
6/18		
7/18		
9/18		
10/18		
12/18		

그림 5. 대표모델의 좌굴모드(ϕ -310 \times 4.96)

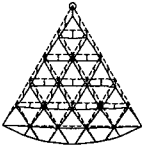
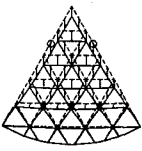
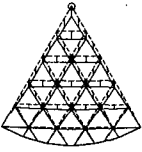
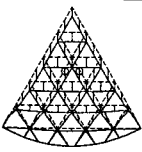
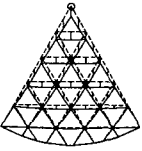
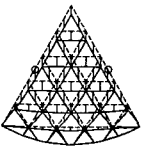
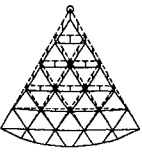
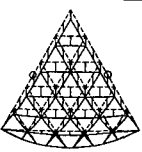
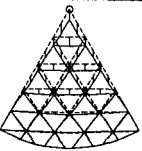
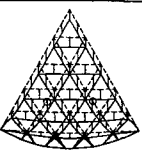
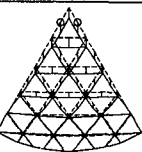
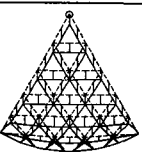
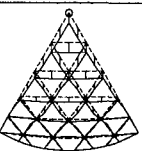
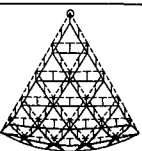
layer 라이즈비	단 층	복 층
4/18	 $V_m=273\text{mm}$	 $V_m=622\text{mm}$
5/18	 $V_m=293\text{mm}$	 $V_m=460\text{mm}$
6/18	 $V_m=313\text{mm}$	 $V_m=358\text{mm}$
7/18	 $V_m=333\text{mm}$	 $V_m=294\text{mm}$
9/18	 $V_m=333\text{mm}$	 $V_m=217\text{mm}$
10/18	 $V_m=342\text{mm}$	 $V_m=170\text{mm}$
12/18	 $V_m=313\text{mm}$	 $V_m=140\text{mm}$

그림6. 대표모델의 변형모드(ϕ -310×4.96)

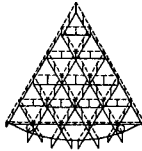
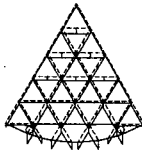
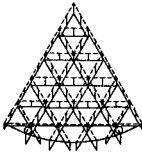
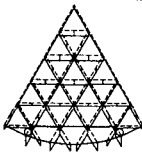
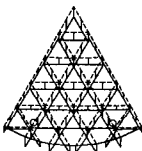
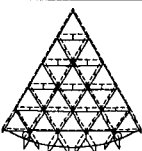
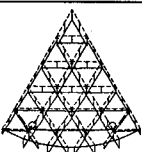
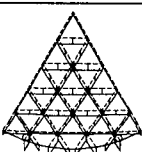
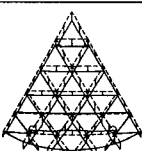
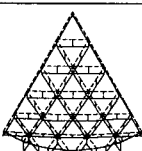
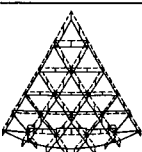
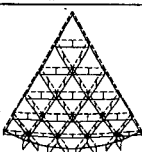
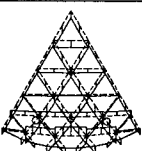
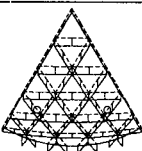
layer 라이즈비	단 층	복 층
4/18	 $F_m=230\text{t}$	 $F_m=1059\text{t}$
5/18	 $F_m=271\text{t}$	 $F_m=1016\text{t}$
6/18	 $F_m=324\text{t}$	 $F_m=948\text{t}$
7/18	 $F_m=360\text{t}$	 $F_m=893\text{t}$
9/18	 $F_m=409\text{t}$	 $F_m=764\text{t}$
10/18	 $F_m=420\text{t}$	 $F_m=637\text{t}$
12/18	 $F_m=408\text{t}$	 $F_m=408\text{t}$

그림7. 대표모델의 부재축응력분포(ϕ -310×4.96)

4-3. 부재축응력

그림7에서 알 수 있듯이 단·복층 공히 저면부근에서 최대축력을 보이나, 라이즈비 12/18인 경우는 최대

축력 발생부재가 중심부로 이동하며, 라이즈비가 증가할수록 저면부근의 부재력이 압축력에서 인장력으로 바뀌는 현상이 일어난다. 그러나, 단층은 라이즈비가 증가할수록 최대축력값은 어느 한 시점의 라이즈비(ϕ -310×4.96부재는 10/18, ϕ -250×6.00부재는 9/18, ϕ -180×7.61부재는 7/18)이후에는 감소하나, 복층은 사용부재에 상관없이 라이즈비가 증가할수록 최대축력값은 감소한다.

4-4. 좌굴내력 및 좌굴내력비

표3에서 보여주듯이 사용부재에 관계없이 라이즈비가 클수록 좌굴내력의 증가를 보이다가 대개 라이즈비 9/18부근에서 좌굴내력의 감소를 보이고 있으며, 동일한 라이즈비하에서 단·복층 공히 단면반경이 작은 부재일수록 좌굴내력이 감소한다.

표 3. 단층과 복층의 좌굴내력, α 값 및 ξ 값 (qs, qd : t/m²)

사용부재 라이즈비	ϕ -310×4.96					ϕ -250×6.00					ϕ -180×7.61				
	qs	α	qd	α	ξ	qs	α	qd	α	ξ	qs	α	qd	α	ξ
4/18	1.549	1	14.734	1	2.3	1.180	1	9.596	1	2.0	0.780	1	4.868	1	1.5
5/18	2.236	1.4	17.994	1.2	1.9	1.830	1.5	11.897	1.2	1.6	1.021	1.3	5.364	1.1	1.3
6/18	2.948	1.8	20.525	1.4	1.7	2.421	2.0	13.656	1.4	1.4	1.150	1.4	6.084	1.2	1.3
7/18	3.510	2.2	22.851	1.5	1.6	2.638	2.2	15.086	1.5	1.4	1.281	1.6	6.655	1.3	1.3
9/18	4.214	2.5	25.711	1.6	1.5	2.870	2.3	15.994	1.6	1.3	1.345	1.6	6.755	1.3	1.3
10/18	4.352	2.5	24.201	1.5	1.4	2.857	2.2	15.503	1.5	1.3	1.291	1.5	6.953	1.3	1.3
12/18	4.205	2.3	22.627	1.3	1.3	2.687	2.0	13.656	1.2	1.2	1.190	1.3	6.191	1.1	1.3

qs : 단층의 좌굴내력

qd : 복층의 좌굴내력

α : 단층 및 복층모델의 좌굴내력을 각각의 총부재길이로 나눈 값을 라이즈비 4/18의 값으로 무차원화한 값

ξ : 단층에 대한 복층의 좌굴내력비를 단층에 대한 복층의 부재밀도비로 나눈 값

라이즈비에 따른 α 값을 그래프로 나타낸 것이 그림8와 그림9이다. 이 결과로 알 수 있듯이 단·복층에 관계없이 부재밀도에 대한 좌굴내력의 관점에서 보면 최적의 라이즈비는 단층 및 복층은 공히 9/18이며 또한 복층은 단층보다 지붕면 곡률의 영향을 적게 받고 있다.

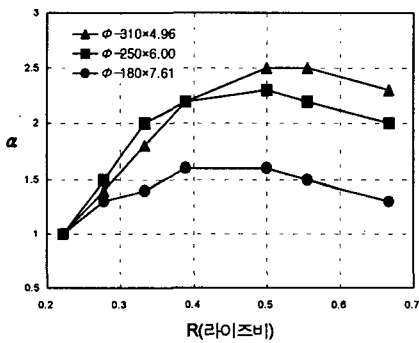


그림 8. 라이즈비에 따른 α 값(단층)

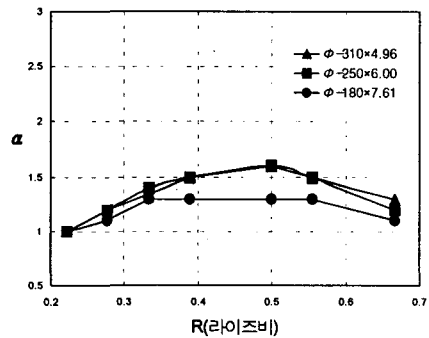


그림 9. 라이즈비에 따른 α 값(복층)

그리고, 표3에서 ξ 값은 ϕ -310×4.96부재는 2.3~1.3, ϕ -250×6.00부재는 2.0~1.2, ϕ -180×7.61부재는 1.5~1.3이다. 라이즈비에 따른 ξ 값을 그림10에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 라이즈비가 클수록 ξ 값이 낮아지고, 동일한 라이즈비에서 단면반경이 작은 부재일수록 ξ 값이 낮다. 이는 라이즈비가 클수록 단층으로, 라이즈비가 작을수록 복층으로 설계하는 것이 유리하다는 것을 나타낸다. 이 특성은 단면반경이 큰

부재일수록 더 잘 나타난다. 따라서, 동일한 라이즈비로 동일한 공간을 덮을 경우, 구조설계 초기단계에서 설계자로 하여금 Layer의 선택을 가능하게 해준다.

5. 결론

본 연구는 라이즈비에 따른 단층과 복층 래티스 돔의 좌굴특성을 비교 검토한 결과, 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 해석모델의 [좌굴내력/총부재밀도]를 계산한 결과 단층과 복층 공히 최적의 라이즈비는 9/18이다.
- 2) 사용부재에 관계없이 [단층에 대한 복층의 좌굴내력비/단층에 대한 복층의 부재밀도비]는 라이즈비가 커질수록 작아진다.
- 3) 라이즈비에 관계없이 사용부재에 따른 [단층에 대한 복층의 좌굴내력비/단층에 대한 복층의 부재밀도비]는 단면반경이 작을수록 작아진다.

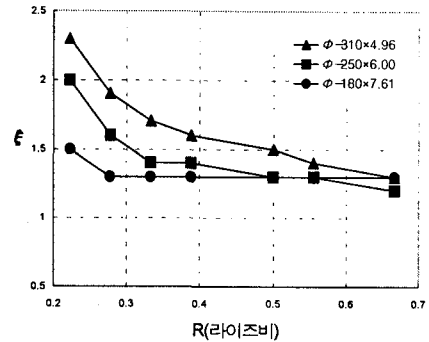


그림 10. 라이즈비에 따른 ξ 값

본 연구를 수행하는데 있어서 연구비를 지원해 주신 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터(STRESS)관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. 坪井善勝, 스페스프레임(立體格子構造)의設計·解析·施工, 1982年度文部省科學研究費補助金, 總合研究(B)研究報告書, 1983, pp.1-13.
2. 李昇宰, 鄭煥穆, 權寧煥, 單層래티스돔의 挫屈特性에 關한 研究(라이즈비의 影響), 韓國電算構造工學會 學術發表會 論文集, 1992.5
3. 權寧煥, 三角形 네트워크를 갖는 單層래티스돔의 挫屈特性에 關한 研究, 釜山大學校 工學博士學位論文, 1993.8.
4. 日置興一郎, ラチスド-ムの不安定現象の概説, 單層ラチスド-ムの安定解析-その現象と問題点-, 日本建築學會シェル空間構造運營委員會, 스페스프레임小委員會, 1989.8, pp.1-23
5. 川井忠彦, 藤谷義信, 挫屈問題解析, 培風館, 1991.
6. 鷺津久一郎 外 4 人, 有限要素法ハンドブック I基礎編, 培風館, 1988.
7. 權宅鎮 外 4名, SPACE FRAME 구조물의 구조해석, 설계 및 시공, 제12회 전산구조공학회 기술강습회, 1995.7.
8. 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터, 대공간구조물의 구조해석 및 설계에 관한 국제심포지엄 논문집, 1997.7
9. 강민화, 단층 및 복층 보울트형 강관 스페이스 프레임의 좌굴특성에 관한 비교연구, 경북대학교 석사학위논문, 1995.2
10. 이호상, 삼각형 네트워크를 갖는 단층 및 복층 스페이스 프레임의 좌굴특성에 관한 비교연구, 경북대학교 석사학위논문, 1998.2