

설비하중을 고려하는 단층래티스돔의 좌굴특성에 관한 연구

A Study on the Buckling Characteristics of Single-Layer Latticed Domes under Equipment-Loading

박 지 영* 정 환 목** 권 영 환***
Park, Ji-Young Jung, Hwan-Mok Kwon, Young-Hwan

ABSTRACT

Recently, the equipments of the structure are increasing remarkably. It is very important to evaluate the stability of the domes under concentrated loading such as a large-scale illuminating, visional, and sound equipment.

The paper is aimed at investigating the buckling characteristics of single-layer latticed domes with triangular network under the uniformly distributed vertical-loading and the partially concentrated equipment-loading.

The results show that the effects of the equipment-loading on the buckling strength is much more sensitive in domes of overall buckling than in domes of member buckling.

1. 서론

생활 수준의 향상과 여가활동의 증가로 체육관, 천시장, 홀 등의 대규모 3차원 구조물에 대한 요구도가 증가되고 있다. 모든 구조물에 있어서의 첨단 설비시설이 기하급수적으로 증가하고 있음을 고려해 보면, 3차원 구조물인 래티스돔에 대규모의 조명, 영상, 음향 시설 등이 집중하중으로 작용될 경우에 대한 안정성 검토는 매우 중요하다고 볼 수 있다. 래티스 돔에 있어서, 이러한 설비시설에 의한 불안정 현상은 심각하리라 예상된다.

지금까지의 등분포하중이나 집중하중에 대한 해석 및 실험적 연구는 많은 연구자들에 의해 행해졌다.^[1-8] 그러나, 등분포하중과 집중하중이 동시에 작용될 경우의 연구는 전무하다. 실제적으로, 하중은 돔 전체에 걸쳐 분포됨과 동시에 설비시설 등에 의한 집중하중이 작용하므로 이러한 하중이 동시에 작용할 경우의 연구는 매우 중요하다고 할 수 있다.

이상 본 연구의 목적은 연직하중과 설비하중이 동시에 작용하는 삼각형 단층래티스 돔에 있어서, 돔의 좌굴특성에 미치는 설비하중의 영향을 검토하는 것을 목적으로 한다.

* 경북대학교 건축공학과 석사과정
** (주)대동기술연구소 연구원
*** 경북대학교 건축공학과 교수

2. 해석모델

2-1. 돔의 형상모델

돔의 형상모델은 문헌 2 와 동일하다.

2-2. 설비하중의 모델

그림 1 과 같이 돔 전체에 연직하중이 작용하고, 동시에 정점과 주위의 6 절점에 설비하중이 일정한 크기로 작용하는 경우를 그 대상으로 한다. 그림 1 의 (가)에서 R 은 곡률반경, r 은 저면반경, h 는 돔의 높이, 그리고 l 은 돔의 정점에서 설비하중점까지의 높이를 나타낸다. 그림 1 의 (나) 및 (다)는 설비하중 작용점 및 임의 절점에 작용하는 연직하중 크기를 면적으로 나타낸 것이다. 여기에서 설비하중의 크기는 그 절점하중으로 작용하는 상당면적으로 무차원화한 값 β 로 나타내며, 본 연구에서는 β 를 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 의 5종류로 모델화하여 계산 예제로서 도입한다.

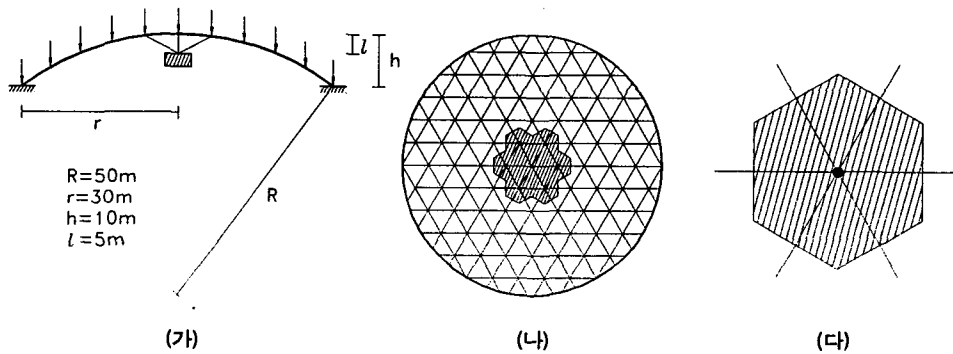


그림 1. 설비하중 모델

3. 해석방법 및 해석상의 제조건

해석방법은 문헌 2 와 동일한 연속체치환법과 이산화해석법을 도입하였다. 연속체치환법에서는 설비하중의 크기를 무시하여 해석하였으며, 이산화해석법에서의 수치계산은 최대변위중분을 갖는 절점변위에 관한 중분법을 적용하였다. 각 중분 단계에서 변위에 따른 하중을 도출할때 설비하중은 각 단계마다 연직하중과 보정하여 계산에 적용하였다.

해석조건으로는 부재의 중간에 중간절점이 있는 1부재 2요소로 했으며, 집합부조건은 강접합, 경계조건은 회전 및 이동을 완전히 구속하는 조건으로 했다. 해석영역은 대칭성을 고려하여 돔의 1/6로 했다.

4. 해석 결과 및 고찰

4-1. 좌굴 내력의 평가

표 1. 좌굴 내력 (t/m²)

모델명		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
형상계수		S=1.9	S=2.1	S=2.3	S=2.7	S=2.9	S=3.3	S=3.9	S=4.3	S=5.0
	q _{cs}	5.16	4.30	3.42	2.55	2.11	1.66	1.21	0.97	0.73
β=0.00	q _{cf0}	5.95	5.12	3.86	2.75	2.30	1.65	0.93	0.62	0.33
	α	1.15	1.19	1.13	1.08	1.09	0.99	0.77	0.64	0.45
	γ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
β=0.25	q _{cf}	5.93	5.10	3.08	2.21	1.85	1.36	0.79	0.50	0.28
	α	1.15	1.19	0.90	0.87	0.88	0.82	0.65	0.52	0.38
	γ	1.00	1.00	0.80	0.80	0.80	0.82	0.85	0.81	0.85
β=0.50	q _{cf}	5.89	3.26	2.26	1.69	1.41	1.09	0.64	0.41	0.23
	α	1.14	0.76	0.66	0.66	0.67	0.66	0.53	0.42	0.32
	γ	0.99	0.64	0.59	0.61	0.61	0.66	0.69	0.66	0.70
β=0.75	q _{cf}	3.52	2.43	1.80	1.37	1.20	0.96	0.57	0.40	0.23
	α	0.68	0.57	0.53	0.54	0.57	0.58	0.47	0.41	0.32
	γ	0.59	0.47	0.47	0.50	0.52	0.58	0.61	0.65	0.70
β=1.00	q _{cf}	2.94	2.00	1.54	1.13	0.98	0.84	0.57	0.39	0.19
	α	0.57	0.47	0.45	0.44	0.46	0.51	0.47	0.40	0.26
	γ	0.49	0.39	0.40	0.41	0.43	0.51	0.61	0.63	0.58

표 1 은 각 모델의 경우에 있어서 설비하중 면적비에 따른 좌굴내력을 나타낸다. 표에서 α 는 이산화해석법에 의한 좌굴내력값 (q_{cf})을 연속체치환법에 의한 좌굴내력값 (q_{cs})으로 무차원화하여 나타낸 것이며, γ는 설비하중의 크기에 따른 좌굴내력값을 설비하중이 없는 경우 (β=0.00)의 좌굴내력값으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 즉

$$\alpha = \frac{q_{cf}}{q_{cs}} \qquad \gamma = \frac{q_{cf}}{q_{cf0}}$$

그림 2 는 표 1 의 결과로부터 무차원화 좌굴내력 α 와 형상계수 S 의 관계곡선을 나타낸다. 그림중의 점선으로 표시한 곡선 α=1.0 은 전체좌굴 내력계수를 나타내는 곡선이며, α=a₁ 은 핀접합에 의한 전체좌굴 내력계수 혹은 절점좌굴 내력계수를 나타내는 곡선이며, α=a_n 은 부재좌굴 내력계수를 나타내는 곡선이다.

그림으로부터 β 의 크기에 관계없이 S≤2.9 인 모델에서는 전체좌굴이 발생함을 알 수 있고 S≥3.3 인 모델에서는 부재좌굴이 발생함을 알 수 있다. 좌굴내력의 크기는 β 가 증가함에 따라 전체좌굴 발생영역에서는 급격하게, 부재좌굴 발생영역에서는 완만하게 감소한다. β=0.25, β=0.50 인 경우 S=1.9 의 모델에서는 좌굴내력이 거의 변화가 없음을 볼 수 있는데 이는 설비하중이 연직하중에 비해 그 크기가 작아서 좌굴내력에 영향을 미치지 못했음을 의미한다.

그림 3 은 형상계수 S 와 좌굴내력비 γ 의 관계곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 2.3≤S≤2.9 의 범위에서는 좌굴내력에 미치는 설비하중의 영향이 매우 큰 것을 나타내고 있다. 특히, 설비하중의 영향이 가장 큰 모델은 S=2.3 인 경우이며, 이 경우 β=0.50 에서 좌굴내력의 저하율은 역직하중만 작용한 경우의 약 59%, β=0.75 에서 약 47%, 그리고 β=1.00 에서 약 40% 이다.

한편 S≤2.1 혹은 S≥3.3 의 범위에서는 그 영향이 둔감한 것을 나타내고 있다. 이것은 매우 주목해야할 현상으로 둘의 형상계수가 아주 크거나 적은 경우는 네트워크가 갖는 기하학적인 형상

이 역학적으로 불리하다는 것을 의미하며 이 불리한 역학적조건이 설비하중의 좌굴내력에 미치는 영향을 둔감하게 한 것으로 사료된다.

실제적으로 시공되는 돔의 형상계수가 대부분 2.9 이하임을 고려해 보면 설비하중이 좌굴내력에 미치는 영향이 매우 کم을 알 수 있다.

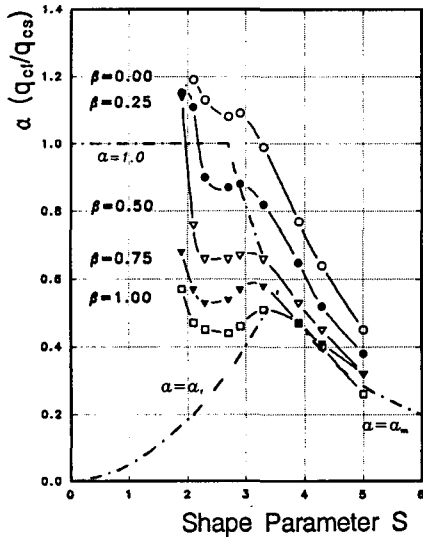


그림 2. α -S 관계곡선

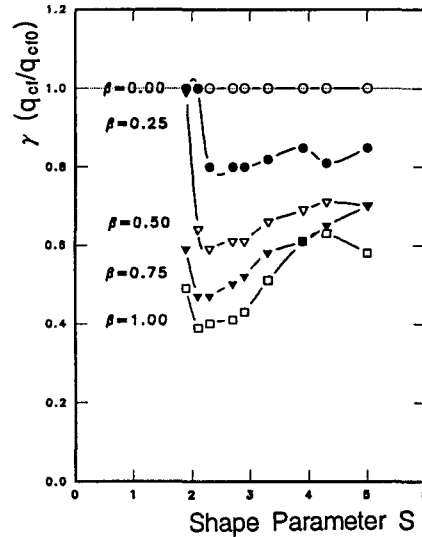


그림 3. γ -S 관계곡선

4-2. 좌굴모드, 변형모드, 축력모드

그림 4는 형상계수 중에서 대표적으로 $S=1.9$ 와 $S=5.0$ 에 대한 좌굴모드, 좌굴직전 변형분포, 축력분포 등을 나타낸다. 그림에서 \circ 로 표시한 부분은 각각 좌굴점, 최대변위점, 최대축력점을 나타낸다.

좌굴모드에 있어서, $\beta \leq 0.50$ 에서는 $\beta=0.00$ 의 경우와 형태가 유사하고, $\beta \geq 0.75$ 에서는 돔의 정점에서 좌굴하고 있다. $S=1.9$ 모델에서는 β 에 관계없이 전체좌굴이 발생하며, $S=5.0$ 모델에서는 β 에 관계없이 부재좌굴이 발생한다.

좌굴직전 변형분포에 있어서, 좌굴모드에서 검토된 전체좌굴을 발생시키는 모델에서는 좌굴점과 좌굴직전 최대변위점이 거의 동일하다. 이것은 좌굴전 변형이 좌굴특성에 직접적으로 영향을 주고 있음을 나타낸다.

좌굴직전 축력분포는 S 와 β 에 관계없이 전 모델 공히 거의 동일한 위치에서 최대축력이 발생한다.

이상으로부터 설비하중을 고려한 경우에 있어서 좌굴, 변형 및 축력모드의 변화는 돔의 형상계수 S 및 설비하중의 크기 β 와 직접적으로 관련하고 있음을 알 수 있으며, 또한 이들 모드는 궁극적으로 좌굴내력에 영향을 미치게 될 것이다. 한편 설비하중에 의한 집중하중이 작용했음에도 불구하고 좌굴전 축력분포는 경계부를 제외한 전부재에 걸쳐 일정한 것으로 미루어, 본 모델의 네트워크 분할이 합리적임을 알 수 있다.

형상 계수	MODE	$\beta=0.00$	$\beta=0.25$	$\beta=0.50$	$\beta=1.00$
S=1.9	좌 편 모 드				
	편 향 모 드				
	축 편 모 드				
S=5.0	좌 편 모 드				
	편 향 모 드				
	축 편 모 드				

그림 4. 편향모드, 편향모드, 축편모드

5. 결론

본 연구에서는 연직분포하중과 설비하중이 동시에 작용하는 삼각형 단층래티스 돔의 좌굴특성에 대하여 검토했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 설비하중에 따른 좌굴특성은 돔의 형상 및 설비하중의 크기와 직접적인 관련을 가지고 있었다.
2. 부재좌굴을 발생하는 S의 범위에서보다 전체좌굴을 발생하는 S의 범위에서 좌굴내력에 미치는 설비하중의 영향이 큰것을 알 수 있었다.
3. 실제적으로 시공되는 단층래티스 돔의 경우, 형상계수 S는 2.9 이하가 최적형상으로 판단되며 설비하중을 고려할때 이 범위에 해당하는 돔에 대해 특히 안정문제에 주의를 요한다.

참고문헌

1. M. Yamada, Wang Li, A. Yamamoto, Buckling of Single-Layer Latticed Domes with Triangular Network, Proceeding of the Third Summer Colloquium on Shell and Spatial Structures, August 1990.
2. 權寧煥, 崔永植, 三角形네트워크 單層래티스돔의 挫屈特性에 있어서의 接合部 剛性の 影響에 관한 研究, 大韓建築學會 論文集, 1993. 5.
3. 박지영, 정환목, 권영환, 접합부 편심을 고려한 단층래티스돔의 좌굴특성에 관한 연구, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993. 가을
4. 박정우, 정환목, 권영환, 단층래티스돔의 좌굴특성에 미치는 형상초기부정에 관한 연구(I) (제 1 보 강접합의 경우), 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993. 가을
5. 정환목, 권영환, 단층래티스돔의 좌굴특성에 미치는 형상초기부정에 관한 연구(II) (제 2 보 핀 접합의 경우), 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993. 가을
6. 日置興一郎 他, 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営委員會, スペースフレーム小委員會, 1989.8.
7. 정환목, 권영환, 최영식, 삼각형네트워크 단층강접래티스돔의 좌굴특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 1993.2.
8. 권영환, 삼각형네트워크를 갖는 단층래티스돔의 좌굴특성에 관한 연구, 부산대학교 박사학위논문 1993.8.