

## 형상초기부정을 갖는 단층래티스돔의 좌굴내력에 관한 설비하중의 영향

### An Effect of Equipment-Loading on the Buckling Strength of Single-Layer Latticed Domes with Geometrical Imperfection

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

#### ABSTRACT

The paper is aimed at investigating the buckling strength of single-layer latticed domes with the geometrically initial imperfection under the uniformly distributed vertical-loading and the partially concentrated equipment-loading. The results show that the effect of initial imperfection on the buckling strength, if the magnitude of equipment-loading is small, is much more sensitive in domes of overall buckling than in domes of member buckling, but with increasing equipment-loading, it is very sensitive both in domes of overall buckling and of member buckling

#### 1. 서론

생활 수준의 향상에 의한 여가활동의 증가로 체육관, 전시장, 홀 등의 대규모 3차원 대공간 구조물에 대한 요구도가 점점 증가되고 있다. 이들 대공간 구조물 중 단층래티스돔은 경량이면 서도 높은 강성을 갖는 역학적으로 매우 유리한 구조로 널리 인정되고 있다.

그러나 이 구조물은 외력이 어느 한계를 넘으면 강성이 약한 부분에서 국부좌굴이 발생하기 쉽고 이것은 결국 구조물 전체의 붕괴를 유발하게 된다. 그리고 실제의 구조물에 있어서는 기하학적으로 초기부정이 없는 완전한 형상의 돔을 시공한다는 것은 거의 불가능하므로, 이것을 고려할 경우 이상적인 완전계 돔에 비해 좌굴내력의 관점에서 매우 불리하게 작용되어 질 것이다.

특히 이들 실제의 구조물에 대규모의 조명, 영상, 음향기기 등의 설비시설이 집중하중으로 작용할 경우 이에 대한 안정성 검토는 매우 중요하다고 사료된다.

본 연구는 전보<sup>[1]</sup>에서 이미 발표한 이상적인 완전계 단층래티스 돔의 좌굴내력에 미치는 설비하중의 영향 검토에 이어, 실제 구조물의 시공시 피할 수 없는 형상초기부정을 갖는 불완전계 단층래티스돔의 좌굴내력에 미치는 설비하중의 영향을 검토하는 것을 목적으로 한다.

\* 경북대학교 건축공학과 석사과정  
\*\* (주)대동기술연구소 책임연구원  
\*\*\* 경북대학교 건축공학과 교수

## 2. 해석모델

### 2-1. 돔의 형상과 설비하중의 모델

돔의 형상과 설비하중의 모델은 그림 1과 같으며 문헌 1과 동일하다. 돔의 형상계수로는  $S^{[2]}$  를 도입한다. 설비하중의 크기는 그 절점하중으로 작용하는 상당면적으로 무차원화한 값  $\beta$  로 나타내며, 본 연구에서는  $\beta$  를 0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 의 5종류로 모델화하여 계산 예제로서 도입한다.

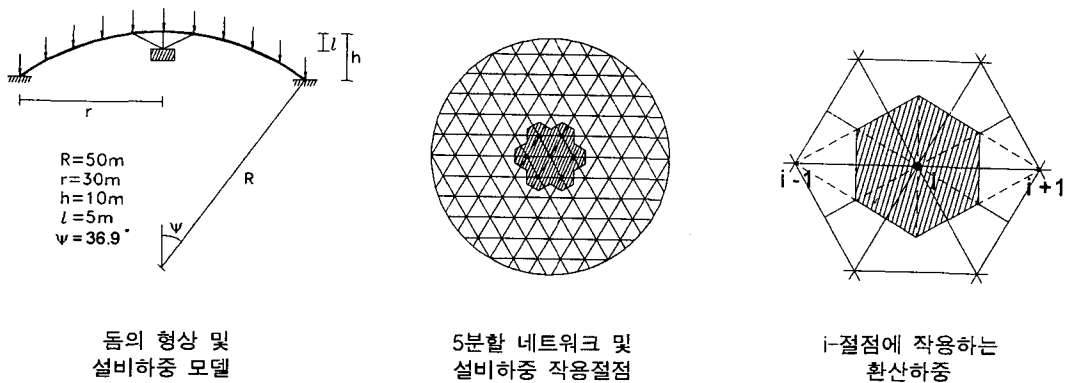


그림 1. 해석 모델

### 2-2. 형상초기부정 및 그 진폭의 모델화

형상초기부정 및 그 진폭의 모델은 문헌 2 와 동일하다. 형상초기부정의 영향에 대해 해석하는 경우 고려되는 형상초기부정의 수는 무수히 존재하며 시공전 이 부정모드를 인지하여 모든 부정모드에 대해 해석하는 것은 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 좌굴특성에 가장 불리한 부정의 분포형상을 도출하여 그 좌굴내력을 안전률의 개념으로 설계에 도입하는 방법이 현실적이라 생각된다. 즉, 부정형은 좌굴내력에 가장 민감하게 영향을 미치는 형상초기부정이 없는 완전계돔의 1차 좌굴모드를 도입하며<sup>[2-4]</sup>, 부정의 크기를 나타내는 진폭은 초기부정의 최대진폭을 돔의 등가 단면 2차반경으로 무차원화하여 나타낸  $\xi$  로 표기하여 나타내며 크기는  $\xi=0.0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2$  의 5종류의 모델을 해석대상으로 한다.

## 3. 해석방법 및 해석상의 제조건

해석방법은 문헌 1과 동일한 연속체치환법과 이산화해석법을 도입하였다. 연속체치환법에서는 설비하중의 크기를 무시하여 해석하였다. 이산화해석법에서의 수치계산은 기하학적 비선형성을 고려하는 유한요소법을 적용하였다. 수치계산은 변위중분법에 의했으며 각 중분 단계에서 변

위에 따른 하중을 도출할때 설비하중은 각 단계마다 연직하중과 보정하여 계산에 적용하였다. 해석조건으로는 부재의 중간에 중간절점이 있는 1부재 2요소로 했으며, 접합부조건은 강접합, 경계조건은 회전 및 이동을 완전히 구속하는 조건으로 했다. 해석영역은 대칭성을 고려하여 둘의 1/6로 했다.

#### 4. 해석 결과 및 고찰

##### 4-1. 좌굴 내력의 평가

표 1. 좌굴내력 (t/m<sup>2</sup>)

MODEL		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
SHAPE PARAMETER		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 <sub>cs</sub>		5.16	4.30	3.42	2.55	2.11	1.66	1.21	0.97	0.73	
q <sub>cf</sub>	ξ=0.0	β=0.00	5.95	5.12	3.86	2.75	2.30	1.65	0.93	0.62	0.33
		β=0.25	6.05	5.10	3.08	2.21	1.85	1.36	0.79	0.50	0.28
		β=0.50	6.01	3.26	2.26	1.69	1.41	1.09	0.64	0.41	0.23
		β=0.75	3.52	2.43	1.80	1.37	1.20	0.96	0.57	0.40	0.23
		β=1.00	2.94	2.00	1.54	1.13	0.98	0.84	0.57	0.39	0.19
q <sub>imp</sub>	ξ=0.2	β=0.00	4.73	3.93	3.08	2.20	1.69	1.31	0.80	0.57	0.32
		β=0.25	4.74	3.94	2.42	1.75	1.35	1.05	0.64	0.45	0.25
		β=0.50	4.76	2.57	1.93	1.41	1.17	0.90	0.53	0.37	0.21
		β=0.75	2.58	2.65	1.70	1.15	0.95	0.75	0.45	0.32	0.18
		β=1.00	2.16	1.77	1.33	0.97	0.85	0.63	0.39	0.26	0.15
	ξ=0.4	β=0.00	4.09	3.35	2.59	1.84	1.38	1.13	0.76	0.51	0.31
		β=0.25	4.11	3.37	2.04	1.46	1.10	0.88	0.60	0.41	0.25
		β=0.50	4.12	2.18	1.67	1.19	0.97	0.78	0.52	0.34	0.20
		β=0.75	2.25	1.85	1.39	0.99	0.80	0.65	0.44	0.29	0.17
		β=1.00	1.93	1.57	1.17	0.83	0.68	0.55	0.38	0.25	0.15
	ξ=0.8	β=0.00	3.32	2.67	2.03	1.38	1.00	0.84	0.63	0.47	0.28
		β=0.25	3.34	2.68	1.62	1.10	0.80	0.65	0.50	0.37	0.22
		β=0.50	3.35	1.77	1.37	0.92	0.73	0.60	0.46	0.33	0.20
		β=0.75	1.88	1.56	1.18	0.79	0.62	0.51	0.39	0.29	0.16
		β=1.00	1.63	1.37	1.03	0.68	0.54	0.44	0.33	0.25	0.14
	ξ=1.2	β=0.00	2.88	2.29	1.79	1.27	0.77	0.63	0.52	0.42	0.26
		β=0.25	2.91	2.30	1.43	0.90	0.63	0.50	0.41	0.33	0.21
		β=0.50	2.92	1.53	1.22	0.75	0.57	0.47	0.38	0.30	0.18
		β=0.75	1.59	1.35	1.00	0.64	0.48	0.39	0.32	0.26	0.15
		β=1.00	1.37	1.18	0.93	0.55	0.41	0.33	0.27	0.23	0.13

표 1 은 각 모델의 경우에 있어서 설비하중의 크기 및 형상초기부정의 진폭 크기에 따른 좌굴 내력값을 나타낸다. 표에서 q<sub>cs</sub>는 연속체치환법에 의한 좌굴내력값, q<sub>cf</sub>는 이산화해석법에 의한 좌굴내력값을 나타낸다.

그림 2 는 표 1 의 결과로부터 무차원화 좌굴내력 α 와 형상계수 S 의 관계곡선을 나타낸다. 그림에서 α 는 이산화해석법에 의한 좌굴내력값(q<sub>cf</sub>)을 연속체치환법에 의한 좌굴내력값(q<sub>cs</sub>)으로

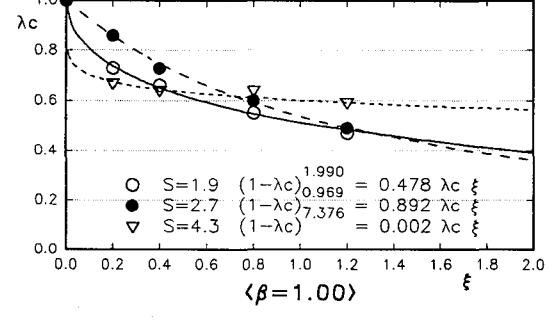
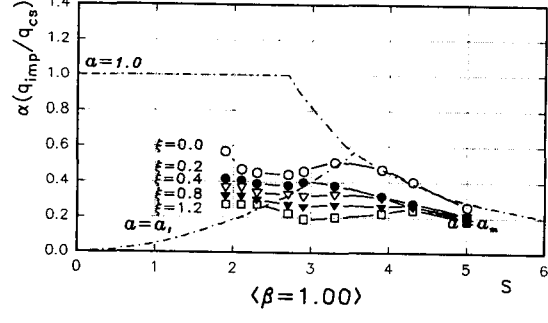
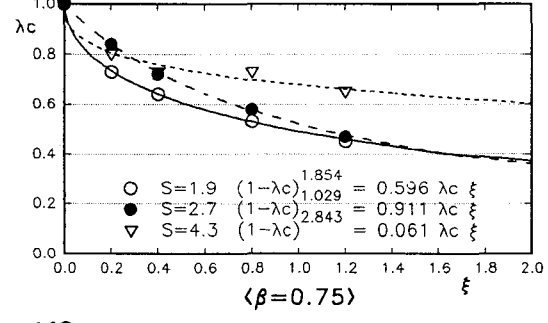
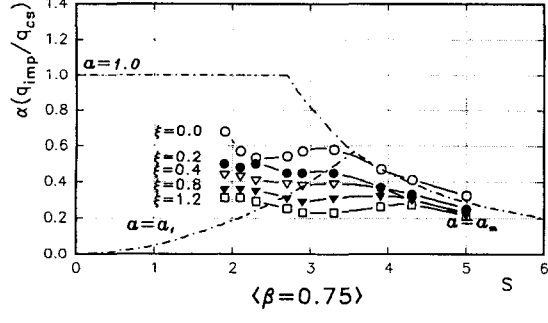
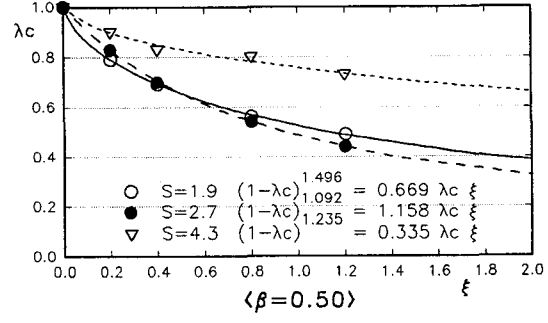
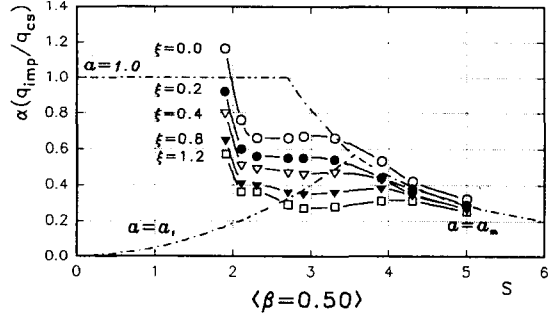
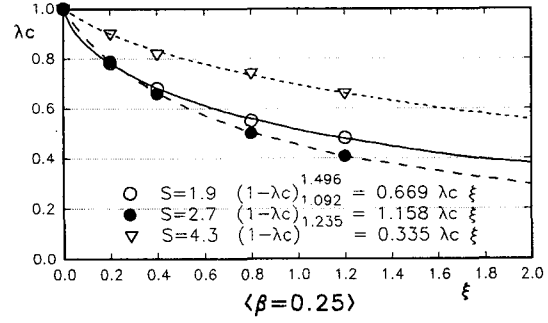
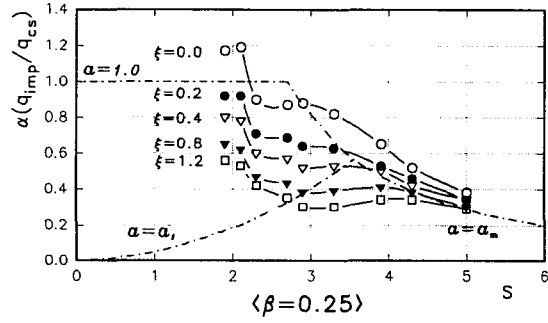
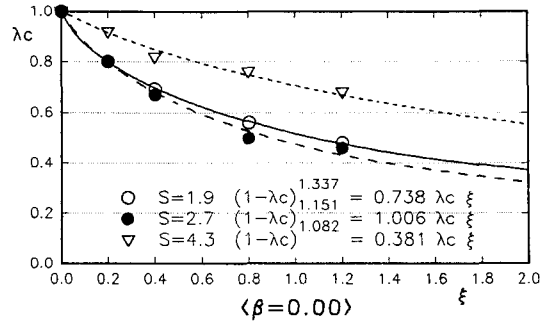
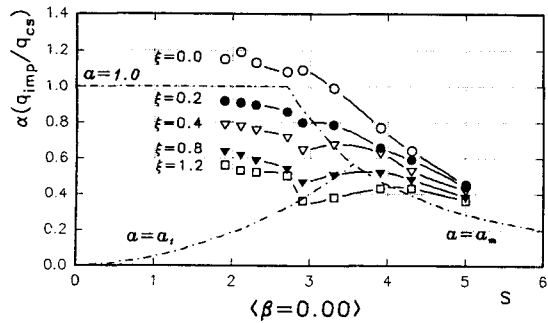


그림 2.  $\alpha$ -S 관계곡선

그림 3.  $\lambda c$ - $\xi$  관계곡선

무차원화하여 나타낸 것이며,  $S$ 는 등의 형상계수를 나타낸다.

그림중의 점선으로 표시한 곡선  $a=1.0$ 은 전체좌굴 내력계수를 나타내는 곡선이며,  $a=a_1$ 은 핀 접합에 의한 전체좌굴 내력계수 혹은 절점좌굴 내력계수를 나타내는 곡선이며,  $a=a_m$ 은 부재좌굴 내력계수를 나타내는 곡선으로 Yamada<sup>[5]</sup>에 의해 제안되었다. 그림에서는  $\beta=0.0\sim\beta=1.0$ 의 경우에 대해, 각 모델에 있어서의 부정의 진폭  $\xi$ 의 크기에 따른 좌굴내력값을 나타낸다. 좌굴내력에 미치는 형상초기부정의 영향은 부재좌굴이 발생하는 등의 형상계수  $S$ 가 큰 범위(본 연구에서는  $S\geq 3.3$ 의 범위에 해당한다)에서 보다는 전체좌굴이 발생하는 등의 형상계수  $S$ 가 작은 범위(본 연구에서는  $S\leq 2.9$ 의 범위에 해당한다)에서 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

$\xi$ 의 증가와 함께 형상초기부정에 따른 좌굴내력의 저하상태는 각 모델 공히 유지하고 있으나 그 저하곡선은  $\beta$ 의 증가와 함께 약간씩 상이한 경향을 나타내고 있다. 다시 말하면 각 모델에 있어서 좌굴내력의 감소경향은 설비하중의 영향에 의해 크게 좌우되는 것을 알 수 있으며 좌굴내력 그 자체는 설비하중뿐만 아니라 형상초기부정에 의해서도 매우 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히  $S=2.9$ 의 경우  $\beta=1.0$  그리고  $\xi=1.2$  경우의 불완전계들의 좌굴내력은 설비하중을 고려하지 않은 완전계들의 좌굴내력에 비해 겨우 18%에 지나지 않는다.

그림 3은 표 1의 결과로부터 무차원화 좌굴내력  $\lambda_c$ 와 형상계수  $S$ 의 관계곡선을 나타낸다.  $\lambda_c$ 는 형상초기부정을 고려한 불완전계들의 좌굴내력  $q_{imp}$ 를 완전계들의 좌굴내력  $q_{cr}$ 로 무차원화한 값이다. 그림 중의 식은 Hutchinson<sup>[6]</sup>에 의해 주어진 곡선적응식을 적용하여 구한 것으로서 대표적 모델에 대한 형상초기부정에 의한 좌굴내력의 저하곡선식이다.

설비하중이 작용하지 않을 경우 ( $\beta=0.0$ )에서는  $\xi$  크기에 관계없이 전체좌굴이 발생하는  $S=1.9$ ,  $S=2.7$ 의 모델에서 좌굴내력이 크게 저하하고 있으며  $\xi=0.8$ 에서 완전계들 좌굴내력의 약 50% 정도로 저하하고 있다. 한편 부재좌굴이 발생하는  $S=4.3$ 의 영역에서는 그 저하율이 둔감하며  $\xi=0.8$ 에서 약 75% 정도이다. 설비하중의 크기가 증가함에 따라  $S$ 에 따른 좌굴내력의 저하율 곡선은  $\xi$ 에 따라 다소 상이한 경향을 나타내고 있다. 특히 설비하중이 커짐에 따라 부재좌굴이 발생하는  $S$ 가 큰 영역( $S=4.3$ )에서도 좌굴내력에 미치는 형상초기부정의 영향이 매우 민감하게 나타나는 것에 주목해야 한다.

#### 4-2. 좌굴모드

형상초기부정을 가지는 단층래티스들의 좌굴모드는 완전계들의 좌굴모드와 유사한 결과를 얻었다. 그 이유는 좌굴내력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가된 완전계 등의 좌굴모드로서 그 부정형을 도입했기 때문이다. 완전계들의 좌굴모드는 문헌 1에서 언급하고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 전보에서 이미 발표한 이상적인 완전계 단층래티스돔의 좌굴내력에 미치는 설비하중의 영향 검토에 이어, 실제구조물의 시공시 피할 수 없는 형상초기부정을 갖는 불완전계 단층래티스돔의 좌굴내력에 미치는 설비하중의 영향을 검토했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 설비하중의 크기가 작은 영역에서는 부재좌굴이 발생하는 돔의 형상계수  $S$  의 범위에서보다 전체좌굴이 발생하는  $S$  의 범위에서 좌굴내력에 미치는 형상초기부정의 영향이 크다.
2. 설비하중의 크기가 큰 영역에서는  $S$  의 범위에 관계없이 좌굴내력에 미치는 형상초기부정의 영향이 크다.
3. 실제 구조물로서 유리한 돔의 형상계수는  $S \leq 2.9$  인 것을 고려할때, 이 범위의 돔에 대해서는 설비하중 및 형상초기부정에 의해서 좌굴내력의 저하 경향이 매우 크므로 설계시 반드시 이들 요소의 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 박지영, 정환목, 권영환, 설비하중을 고려하는 단층래티스돔의 좌굴특성에 관한 연구, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1994. 봄, pp.83-88.
2. JUNG, H. M., KWON, Y. H., KANG, M. M., A Study on the Buckling Characteristics of Single-Layer Latticed Domes with the Initial Geometrical Imperfection, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium 1994, SPATIAL, LATTICE and TENSION STRUCTURES, Atlanta, Georgia, USA, April 1994, pp.488-497.
3. 박정우, 정환목, 권영환, 단층래티스돔의 좌굴특성에 미치는 형상초기부정에 관한 연구(I) (제 1 보 강접합의 경우), 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993. 가을.
4. 정환목, 권영환, 단층래티스돔의 좌굴특성에 미치는 형상초기부정에 관한 연구(II) (제 2 보 핀접합의 경우), 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 1993. 가을.
5. J.W.Hutchinson, Imperfection sensitivity of externally pressurized spherical shells, Journal of Applied Mechanics, Transactions of ASME, March 1967, pp. 49-55.
6. M.Yamada, On the Estimation of the buckling strength of single-layer latticed domes, Proceedings of the Second Japan-Korea Colloquium on Shell and Space Structures, Tokyo, August 1987, pp.143-150.