

單層래티스돔의 挫屈特性에 미치는 形狀初期不整에 關한 研究 (I)
(第 I 報 剛接合의 경우)

Study on Buckling-Characteristics of Single-Layer Latticed Domes
subject to Initial Imperfection (I)

(Part I In the case of Rigid-Joint)

朴 貞 雨* 鄭 煥 穆** 權 寧 煥***
Park, Jeong-Woo Jung, Hwan-Mok Kwon, Young-Hwan

ABSTRACT

The geometrical initial imperfection is generally described that a dome digresses from ideal shape. In actual domes the mode and amplitude for initial imperfection appear variously and affect buckling-strength sensitively.

This study investigates the buckling characteristics of single-layer latticed domes with triangular network subjected to initial imperfection.

Additionally, this study is to get the data that are to formulate the general equation taking initial imperfection into consideration.

1. 序 論

單層래티스돔의 挫屈特性에 대해 검토하는 경우 고려해야 할 구체적인 문제중의 하나는 形狀初期不整이다. 形狀初期不整은 구조물의 설계 및 시공상의 오차에 의해 발생하며 이상적 돔형상으로부터 어긋남을 의미한다. 이로 인해 제작 완성된 돔의 初期不整모드는 무한하게 존재할 수 있으며 그 영향 또한 민감할 것으로 기대되며 이에 대한 많은 연구가 요구되고 있는 실정이다.

한편 本 연구에 있어서는 耐力의 측면에서 가장 불리하게 작용하는 挫屈모드를 形狀初期不整形으로 선정하여 挫屈特性에 미치는 영향을 검토하며, 설계단계에서의 해석과 시공후의 건물과의 대응을 명확히 하기 위해 形狀初期不整을 고려하는 一般化 挫屈耐力式을 유도하는 기초자료를 제공하는데 그 목적을 둔다.

* 慶北大學校 建築工學科 碩士課程

** 慶北大學校 POST-DOC.

*** 慶北大學校 建築工學科 教授

2. 解析모델과 解析方法 및 解析上的 諸條件

해석모델의 형상제원 즉 네트워크 분할, 곡률반경, 저면반경, 돔의 높이 및 반개각등은 기본적으로 문헌1과 동일하며, 해석방법은 形狀初期不整量의 크기를 4단계로 변화시켜 구심외압 및 연직 하중의 하중조건에 대해 離散化解析法으로 검토를 행하였으며, 기본적으로는 문헌1의 離散化解析法과 동일하다. 한편 좌굴내력의 무차원화량으로 도입되는 連續體置換法에 의한 해석결과는 문헌1의 결과를 그대로 적용하였다. 또한 돔의 해석영역, 부재제원 및 해석상의 정밀도등도 문헌1에 준한다.

3. 形狀初期不整의 모델화

3-1. 不整分布의 모델화

形狀初期不整의 영향에 대하여 해석하는 경우 고려되는 形狀初期不整의 모드는 무수히 존재하며 시공전 이들 부정모드를 인지하는 것과 그 전부를 해석하는 것은 거의 불가능에 가깝다. 그러므로 挫屈特性에 가장 불리한 不整의 분포형상을 도출하여 그때의 挫屈耐력을 안전율의 개념으로 설계에 도입하는 방법이 오히려 현실적이라고 사료된다.

Yamada 등^{12,31}의 선행연구에 의하면 돔 및 구형셸의 경우 완전계에서 구해진 分岐挫屈모드 혹은 극대점에서 발생하는 최대변위모드를 不整의 형상으로 도입해 그 해석을 행한 결과, 이들 부정형이 挫屈耐력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서도 돔의 완전계에 대해 구해진 分岐挫屈모드를 그 不整의 분포형상으로 도입하기로 한다.

그림 1은 연직하중을 받는 임의 모델에 대한 완전계 돔의 좌굴모드로서, 形狀初期不整의 분포형상 및 진폭을 보이고 있다. 그림에서 점선은 완전계 돔을 나타내고 실선은 初期不整形을 나타내며 Δ_{max} 은 최대진폭을 나타낸다. 한편 部材挫屈이 발생하는 모델의 경우 그것과 특성이 유사한 全體

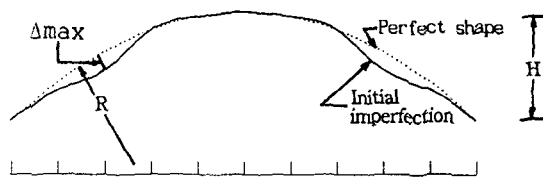


그림 1. 不整분포의 형상

挫屈이 발생하는 모델의 挫屈모드를 도입하여 해석을 행하는 것이 타당하나, 본 연구에서는 돔의 형상계수 S(문헌 1참조)가 큰 모델의 경우 初期不整形의 도입에 대한 간단화를 위해 부재좌굴의 分岐挫屈모드를 그대로 도입하기로 한다.

3-2. 初期不整의 振幅에 대한 모델화

시공후 발생하는 形狀初期不整量의 크기는 설계 및 시공의 정도문제와 관련하는 것으로 그 정확한 값을 인지하는 것은 거의 불가능에 가까우므로, 어떤 기준량에 입각한 체계적인 모델화가 요구된다. 구형셸의 경우 初期不整量의 진폭을 표시하는 파라메타로서 셸의 두께를 도입하는 것에 착안해 본 연구에서도 셸의 두께에 상당하는 등가단면2차반경 i_e 로 기준화하여 形狀初期不整量의 크기를 모델화한다.¹⁴⁾ 즉 최대진폭 Δ_{max} 을 등가단면2차반경으로 무차원화하여 아래식으로 부정량의 크기를 도입한다.

$$\zeta = \frac{\Delta_{max}}{i_e} \quad i_e = \sqrt{\frac{D}{K}} \quad (1-a, b)$$

여기서 ξ 은 形狀初期不整의 무차원화 진폭, D 는 등가침강성 그리고 K 는 등가축강성을 나타낸다.^[5] 본 연구에서는 $\xi = 0.2, 0.4, 0.8, 1.2$ 의 4종류로 구분해 해석한다.

4. 解析結果 및 考察

4-1. 挫屈耐力 및 低下律

1) 球心外壓

표 1은 구심의압을 받는 각모델에 있어서 形狀初期不整의 진폭에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 표중의 λ_c, α 는 아래와 같이 구해진 결과이다.

$$\lambda_c = \frac{q_{imp}}{q_{cf}}, \quad \alpha = \frac{q_{imp}}{q_{cs}} \quad (2-a, b)$$

q_{imp} : 形狀初期不整을 갖는 덤의 挫屈耐力 (t/m^2), q_{cf} : 完全系덤의 挫屈耐力 (t/m^2)
 q_{cs} : 連續體置換法에 의한 덤의 挫屈耐力 (t/m^2)

그림 2에서 $\alpha=1.0$ 은 강접합의 경우 全體挫屈耐力계수의 기준, α_1 은 핀접합의 경우 全體挫屈耐力의 기준, α_m 은 部材挫屈耐力계수의 기준을 나타낸 것으로 완전계 덤의 α - S 관계곡선과 비교를 용이하게 하기 위해 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 S 가 아주 작거나($S \leq 2.1$), 큰 영역에서는($S \geq 4.3$) 不整量의 변화에 대한 간격이 좁아 不整에 둔감한 모습을 보이고 있으며 역으로 $2.3 \leq S \leq 3.9$ 에서는 不整의 영향이 매우 큰 것을 보여주고 있다. 이는 덤의 형상계수가 아주크거나 혹은 적은 경우는 네트워크가 갖는 기하학적인 형상이 역학적으로 불리한 것으로 추정되며 모델3-7($2.3 \leq S \leq 3.9$)의 범위가 역학적으로 이상적인 덤의 형상인 것으로 사료된다.

표 1. 挫屈耐力 및 低下律

모델 (S)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
q_{cs}	5.16	4.30	3.42	2.55	2.11	1.66	1.21	0.97	0.73	
q_{cf}	5.75	4.55	3.57	2.77	2.19	1.63	0.93	0.61	0.33	
$\xi=0.2$	q_{imp}	5.24	3.89	2.82	2.21	1.78	1.31	0.72	0.49	0.31
	λ_c	0.91	0.86	0.79	0.80	0.81	0.80	0.78	0.80	0.95
	α	1.02	0.90	0.82	0.87	0.84	0.80	0.60	0.51	0.42
$\xi=0.4$	q_{imp}	4.91	3.49	2.44	1.93	1.57	1.18	0.66	0.45	0.30
	λ_c	0.85	0.77	0.68	0.70	0.72	0.72	0.71	0.74	0.90
	α	0.95	0.81	0.71	0.76	0.74	0.71	0.55	0.46	0.41
$\xi=0.8$	q_{imp}	4.41	2.97	2.03	1.58	1.28	0.98	0.57	0.40	0.28
	λ_c	0.76	0.65	0.57	0.57	0.58	0.60	0.61	0.65	0.84
	α	0.85	0.69	0.59	0.62	0.61	0.59	0.47	0.41	0.38
$\xi=1.2$	q_{imp}	4.05	2.67	1.90	1.42	1.09	0.83	0.50	0.36	0.26
	λ_c	0.70	0.59	0.53	0.51	0.50	0.51	0.54	0.59	0.80
	α	0.78	0.62	0.56	0.56	0.52	0.50	0.41	0.37	0.36

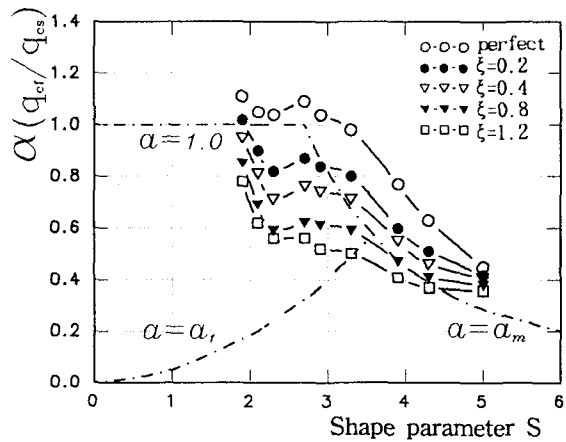


그림 2. 不整量에 대한 λ_c - S 의 關係曲線

한편 각 모델에 대한 低下律 λ_c 와 진폭 ξ 의 관계는 최소2승법으로 근사한 Hutchinson의 曲線適應式的 형태로 나타낼 수 있다. 이 曲線適應式은 해석을 행하지 않은 진폭이 큰 범위의 不整에 대해서도 挫屈耐力의 검토를 가능하게하며 가정한 곡선식은 아래와 같다.^[6]

$$(1-\lambda_c)^p = c \cdot \lambda_c \cdot \xi \quad (3)$$

λ_c : 低下律, ρ, c : 未定係數

그림 3은 각 모델의 曲線適應式과 λ_c - ξ 의 關係曲線을 나타낸 것이다. 그림의 $2.3 \leq S \leq 3.9$ 의 모델에서 不整量의 크기가 작은 영역에 있어서는 挫屈耐力의 低下傾向이 크고 不整量이 큰 영역에서는 그 低下傾向이 둔감한 것을 보이고 있다. 특히 모델 1과 9는 타모델에 비하여 不整에 따른 挫屈耐力의 영향이 작은 것을 나타내고 있다. 또한 구심외압의 경우 이상적인 돔의 형상으로서 언급된 모델 3-7은 不整의 영향에 민감한 것을 나타내고 있다.

- S=1.9 : $(1-\lambda_c)1.261 = 0.267 \lambda_c \xi$
- S=2.1 : $(1-\lambda_c)1.287 = 0.474 \lambda_c \xi$
- S=2.3 : $(1-\lambda_c)1.654 = 0.506 \lambda_c \xi$
- S=2.7 : $(1-\lambda_c)1.457 = 0.608 \lambda_c \xi$
- S=2.9 : $(1-\lambda_c)1.330 = 0.665 \lambda_c \xi$
- S=3.3 : $(1-\lambda_c)1.499 = 0.541 \lambda_c \xi$
- S=3.9 : $(1-\lambda_c)1.925 = 0.338 \lambda_c \xi$
- S=4.3 : $(1-\lambda_c)2.054 = 0.222 \lambda_c \xi$
- S=5.0 : $(1-\lambda_c)1.156 = 0.174 \lambda_c \xi$

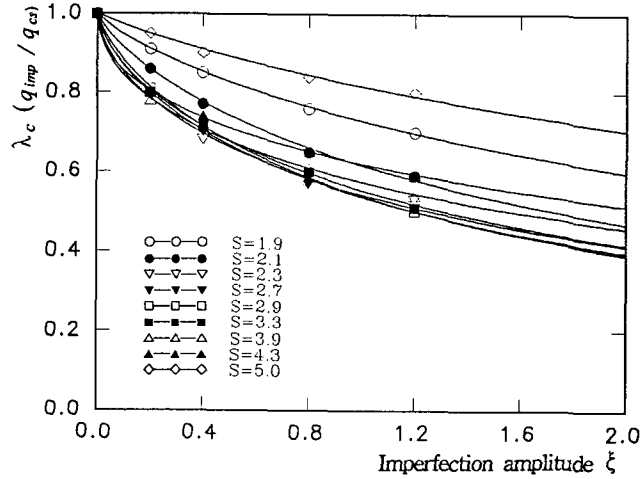


그림 3. λ_c - ξ 의 曲線適應式과 關係曲線

2) 鉛直荷重

표 2는 연직하중을 받는 모델에 있어서 形狀初期不整의 진폭에 대한 해석결과를 나타낸 것이다.

표 2. 挫屈耐力과 低下律

모델 S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
q_{cs}	5.16	4.30	3.42	2.55	2.11	1.66	1.21	0.97	0.73	
q_{cf}	5.95	5.12	3.86	2.75	2.30	1.65	0.93	0.62	0.33	
$\xi=0.2$	q_{imp}	4.73	3.93	3.08	2.20	1.69	1.39	0.80	0.62	0.32
	λ_c	0.80	0.77	0.80	0.80	0.73	0.84	0.86	1.00	0.97
α		0.92	0.91	0.90	0.86	0.80	0.83	0.66	0.64	0.44
	q_{imp}	4.09	3.35	2.59	1.84	1.38	1.23	0.73	0.58	0.30
$\xi=0.4$	λ_c	0.69	0.66	0.67	0.67	0.60	0.74	0.78	0.94	0.90
	α	0.79	0.78	0.76	0.72	0.65	0.74	0.60	0.60	0.41
$\xi=0.8$	q_{imp}	3.32	2.67	2.03	1.38	1.00	1.02	0.64	0.55	0.27
	λ_c	0.56	0.52	0.53	0.50	0.43	0.62	0.69	0.89	0.83
α		0.64	0.62	0.59	0.54	0.47	0.61	0.53	0.57	0.37
	q_{imp}	2.88	2.29	1.79	1.27	0.77	0.87	0.57	0.52	0.26
$\xi=1.2$	λ_c	0.48	0.45	0.46	0.46	0.34	0.53	0.61	0.84	0.77
	α	0.44	0.53	0.52	0.50	0.36	0.52	0.47	0.54	0.36

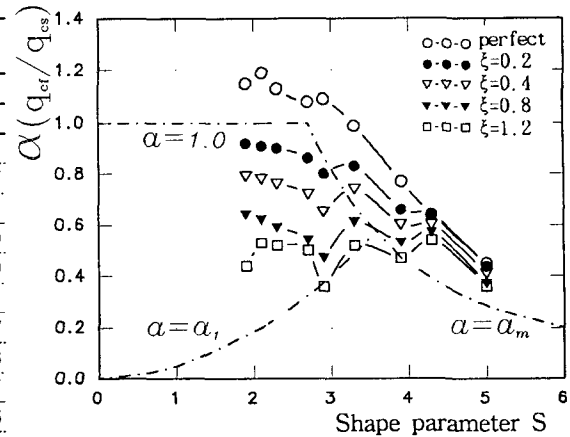


그림 4. 不整量에 대한 λ_c -S의 關係曲線

그림 4는 연직하중의 경우 λ_c -S의 關係曲線을 나타낸다. 그림에서 不整量의 변화에 관계없이 $S \leq 2.9$ 에서는 $\alpha=1.0$ 에 평행한 全體挫屈의 모드를 보여 주고 있으며 그 이상($S \geq 3.3$)에서는

$\alpha = \alpha_0$ 과 나란한 部材挫屈이 발생하고 있음을 보여주고 있다. 또한 不整量의 증가에 대한 α_0 의 변화는 全體挫屈이 발생하는 영역에 비해 部材挫屈의 영역에서는 그 변화의 폭이 작으며 不整에 둔감한 모습을 보이고 있다.

그림 5는 각 모델의 曲線適應式과 $\lambda_c - \xi$ 의 關係曲線을 나타낸 것이다. 이 그림에서 部材挫屈形의 곡선은 全體挫屈形의 곡선보다 윗부분에 분포해 나타나므로 그 低下律의 값은 크고 不整의 영향에 둔감함을 나타내고 있다. 그리고 全體挫屈形에 있어서 ξ 가 작은 범위에서는 각 모델의 低下律 λ_c 는 크게 저하하는 경향을 나타내며, ξ 가 클 수록 그 저하경향은 작아지며 또한 部材挫屈形의 경우에는 形狀初期不整量 ξ 에 관계없이 저하하는 경향을 보이고 있다. 특히 $S=2.9$ 인 모델5의 경우가 형상초기부정에 가장 민감한 경향을 나타내고 있다.

- S=1.9 : $(1-\lambda_c)1.337 = 0.738 \lambda_c \xi$
- S=2.1 : $(1-\lambda_c)1.411 = 0.823 \lambda_c \xi$
- S=2.3 : $(1-\lambda_c)1.222 = 0.906 \lambda_c \xi$
- S=2.7 : $(1-\lambda_c)1.151 = 1.006 \lambda_c \xi$
- S=2.9 : $(1-\lambda_c)1.138 = 0.518 \lambda_c \xi$
- S=3.3 : $(1-\lambda_c)1.247 = 0.613 \lambda_c \xi$
- S=3.9 : $(1-\lambda_c)1.202 = 0.403 \lambda_c \xi$
- S=4.3 : $(1-\lambda_c)0.564 = 0.414 \lambda_c \xi$
- S=5.0 : $(1-\lambda_c)0.751 = 0.402 \lambda_c \xi$

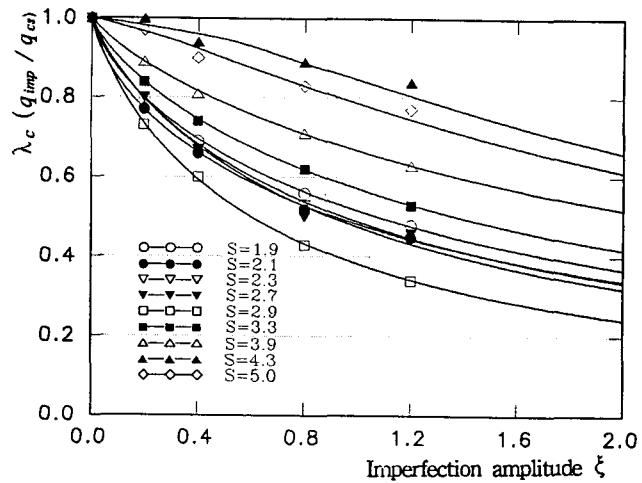


그림 5. $\lambda_c - \xi$ 의 曲線適應式과 關係曲線

4-2. 挫屈모드

그림 6은 全體挫屈을 발생시키는 임의의 한 모델에 대한 挫屈모드를 보이고 있다. 그림에서 보여주듯 形狀初期不整에 의한 挫屈모드는 완전계의 挫屈모드와 크게 상이하지 않다는 것을 알 수 있다.

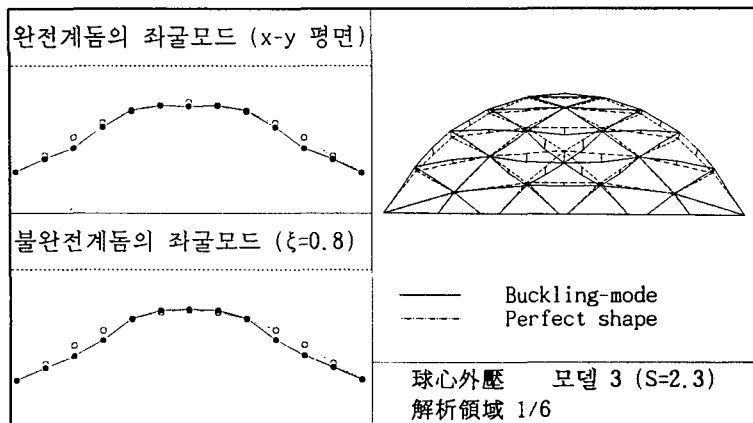


그림 6. 挫屈모드

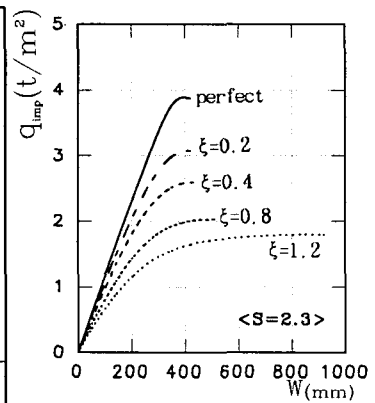


그림 7. 荷重-變位곡선

4-3. 荷重-變位 曲線

그림 7은 그림 6의 모델에 대한 荷重-變位곡선이다. 不整量이 클 수록 挫屈直前 비선형성이 큰 것을 알 수 있으며 이것은 形狀初期不整의 일반적인 현상을 잘 반영해 주고 있다.

5. 結 論

本 研究에서는 문헌1의 결과에 形狀初期不整의 영향을 考慮한 三角形單層래티스돔의 挫屈特性을 研究한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 全體挫屈모드 領域의 모델들이 部材挫屈모드의 모델에 比해 形狀初期不整에 敏感하여 挫屈耐力の 低下가 크게 나타나고 있다.
- 2) 대체적으로 球心外壓보다 鉛直荷重의 경우가 形狀初期不整에 대한 영향이 크며 S의 크기에 따른 挫屈耐力の 低下律의 差도 鉛直荷重이 크다.

參考 文獻

1. 權 寧煥, 崔 永植, 三角形네트워크 單層래티스돔의 挫屈特性에 있어서 接合部剛性の 影響에 關한 研究, 大韓建築學會 論文集, 1993.5
2. 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
3. 日置興一郎 他, ラチスト-ムの不安定現象の概説, 單層ラチスト-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, 스페-스프레小委員會, 1989.8
4. Don O. Brush and Bo O. Almroth, Buckling of Bars, Plates, and Shells, McGRAW-HILL, 1975.
5. 日置興一郎 他, 스페-스프레-ム(立體格子構造)의設計·解析·施工, 1982年度文部性科學研究費補助金, 總合研究(B)研究報告書, 1983
6. Hutchinson, J. W., Imperfection Sensitivity of Externally Pressurised Spherical Shells, Journal of Applied Mechanics, Transaction of ASME, March 1967, pp.49-55.