

구조시스템에 따른 케이블 돔의 정적 불안정거동 특성에 관한 연구

A Study of Static Unstable Behavioral Characteristics of Cable Dome Structures according to the Structural System

조인기* 김형석** 김승덕*** 강문명****
 Cho, In Ki Kim, Hyung Seok Kim, Seung Deog Kang, Moon Myung

Abstract

The cable structure is a kind of ductile structural system using the tension cable and compression column as a main element. From mechanical characteristics of the structural material, it is profitable to be subjected to the axial forces than bending moment or shear forces. And we have to consider the local buckling when it is subjected to compression forces, but tension member can be used until the failure strength. So we can say that the tension member is the most excellent structural member. Cable dome structures are made up of only the tension cable and compression column considering these mechanical efficiency and a kind of structural system. In this system, the compression members are connected by using tension members, not connected directly each other. Also, this system is lightweight and easy to construct. But, the cable dome structural system has a danger of global buckling as external load increases. That is, as the axisymmetric structure is subjected to the axisymmetric load, the unsymmetric deformation mode is happened at some critical point and the capacity of the structure is rapidly lowered by this reason. This phenomenon is the bifurcation and we have to reflect this in the design process of the large space structures. In this study, We investigated the nonlinear unstable phenomenon of the Geiger, Zetlin and Flower-type cable dome.

keywords: Cable Dome, Initial Imperfection, Instability, Nonlinear

1. 서 론

대공간 구조물은 내력의 흐름을 자연스럽게 하고 휨 모멘트의 영향을 가능한 저감시켜 외부하중에 저항하는 구조물로서, 역학적 개념을 기초로 하여 구조시스템의 효율성을 극대화시킨 형태 저항형 구조이다. 이러한 구조는 최소의 재료로 가볍게 대공간을 만들 수 있는 장점을 가지고 있다.

대공간 구조물은 이러한 셸 구조 원리를 이용하여 만들어지며, 구조시스템에 따라 세분하면 그림 1.1과 같이 나타낼수있다.

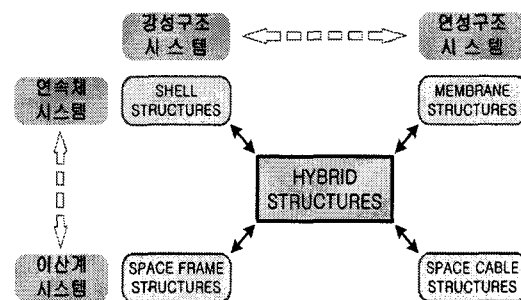


그림 1.1 대공간 구조물의 분류

2002년 월드컵을 통해서 대공간 구조물에 대한 관심이 한층 증대되었고 이에 관한 연구뿐만 아니라 기술력 확보에도 많은 향상을 가져왔다. 앞으로 우주시대를 열어가면서 대공간 구조물에 대한 관심과 발전은 계속될 것이며, 구조물의 건립도 늘어날 것이다.

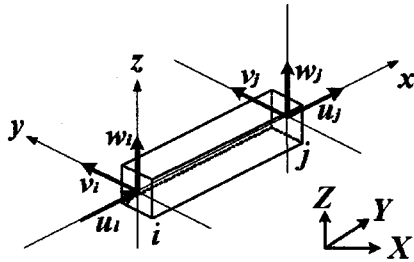
* 정회원 선린대학 건축조형계열 조교수
 ** 정회원 경북대학교 건축공학과 공학박사
 *** 정회원 세명대학교 건축과 부교수
 **** 정회원 경북대학교 건축공학과 교수

이에 따른 안전하고 경제적인 구조물을 구축하기 위해서는 사고 및 붕괴의 원인이 정확히 규명되어야 한다. 즉 설계 과정시 예상하지 못한 사고를 예방하기 위해서는 붕괴 메커니즘에 대한 정확한 파악이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 대공간 구조물을 구축하는 구조시스템 중에서 연속적인 인장부재와 불연속적인 압축부재를 이용하여 경량화 한 케이블 돔 구조물인 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 구조물을 대상으로 구조시스템에 따른 정적 불안정 현상을 규명하고, 설계에 반영할 수 있는 기초적인 자료를 마련하고자 한다.

2. 비선형 강성방정식

국부 좌표계에서 입체 케이블 요소의 요소 좌표계를 그림 2.1에서와 같이 정의한다.



$\begin{cases} x, y, z : \text{요소 좌표계} \\ u, v, w : \text{요소내 변위} \end{cases}$

그림 2.1 케이블 요소의 요소 좌표계

가상일의 원리를 이용하여 요소의 비선형 강성방정식을 구하면 식(2.1)과 같다

$$f^{(0)} + f = Al(A_1^T \sigma_x^{(0)}) + Al(\sigma_x^{(0)} B^T B) d + AIE(A_1^T A_1) d + \text{고차항} \quad (2.1)$$

식(2.1)에서 d 에 관한 고차항의 소거로 인하여 생기는 불평형력은 식(2.2)와 같이 정의한다.

$$r = AlA_1^T \sigma_x^{(0)} - f^{(0)} \quad (2.2)$$

식(2.2)를 이용하면 증분방정식은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$f - r = AIE(A_1^T A_1) d + Al(\sigma_x^{(0)} B^T B) d \quad (2.3)$$

여기서,

$$k_E = AIE(A_1^T A_1): \text{요소의 탄성 강성행렬}$$

$$k_G = Al(\sigma_x^{(0)} B^T B): \text{요소의 기하 강성행렬}$$

3. 해석모델

케이블 돔 구조물의 구조시스템에 따른 정적 불안정 현상을 파악하기 위해 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔을 해석모델로 선택하였다. 이러한 현상을 규명하기 위해 그림 3.1 - 3.3과 같은 간단한 케이블 돔을 해석모델로 선택하였다.

해석모델의 절점번호와 요소번호는 그림 3.1 - 3.3과 같다. 요소번호는 상현과 하현부재를 나타내기 위해 하현부재는 괄호를 이용하였다. 각 절점의 좌표는 표 3.1과 같다. 여기서 해석모델의 형상이 축대칭이므로 한 개의 strip만을 나타내었다.

각 부재의 단면적은 표 3.2, 3.3과 같고 물성치는 구조용 스트랜드 로우프의 값을 사용하였다.

$$\text{탄성계수} : E = 1.6 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{밀도} : \rho = 7.85 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$$

경계조건은 외곽의 절점들, 즉 7, 12, 17, 22, 27, 32 등 6개 절점을 고정시키고, 나머지 절점은 자유로 한다.

표 3.1 절점좌표 (단위 : cm)

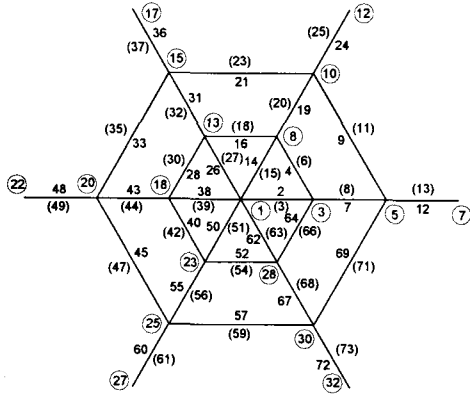
절점번호	1	2	3	4	5	6	7	
Geiger	X좌표	0.0	0.0	20.0	20.0	40.0	40.0	60.0
	Z좌표	21.0	15.0	18.5	4.50	11.5	-11.5	0.0
Zetlin	X좌표	0.0	0.0	20.0	20.0	40.0	40.0	60.0
	Z좌표	11.0	-11.0	9.5	-9.5	6.0	-6.0	0.0
Flower	X좌표	0.0	0.0	20.0	20.0	34.6	34.6	60.0
	Z좌표	21.0	15.0	18.5	4.50	11.5	-11.5	0.0

표 3.2 부재의 단면적-Geiger&Zetlin(단위 : cm²)

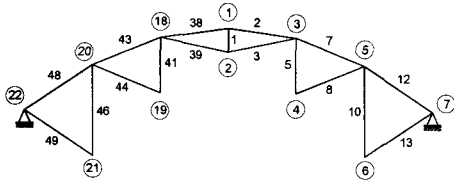
부재번호	1	2	3	4	5	6	7
단면적	1.00	0.01	0.01	0.01	1.00	0.02	0.02
부재번호	8	9	10	11	12	13	
단면적	0.02	0.01	1.00	0.04	0.04	0.04	

표 3.3 부재의 단면적-Flower(단위 : cm²)

부재번호	1	2	3	4	5	6	7	8
단면적	1.00	0.01	0.01	1.00	0.02	0.02	0.02	0.02
부재번호	9	10	11	12	13	14	15	
단면적	0.02	1.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	

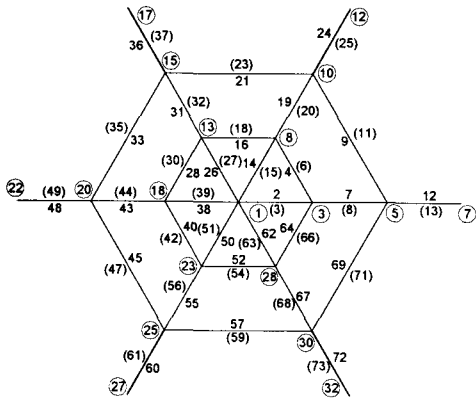


(a) 평면도

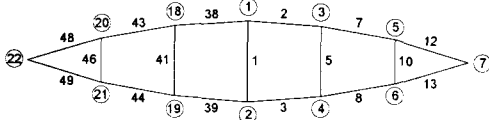


(b) 단면도

그림 3.1 해석모델 - Geiger형

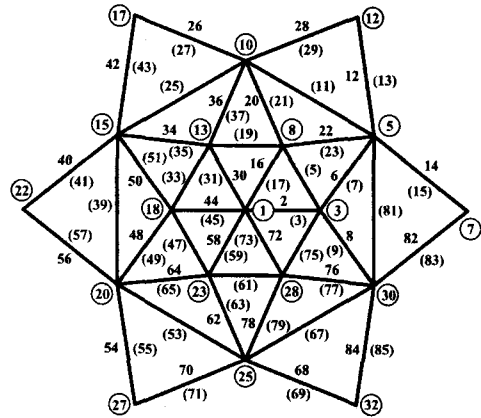


(a) 평면도

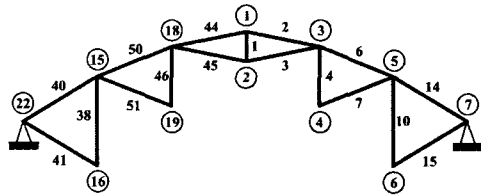


(b) 단면도

그림 3.2 해석모델 - Zetlin형



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 3.3 해석모델 - Flower형

하중조건은 그림 3.4와 같은 전체축대칭 하중모드를 사용하였다. 축대칭 하중조건에서 단위하중 모드와 각각의 절점이 부담하는 면적의 비로 하는 면적비 하중모드로 나누어 불안정 거동특성을 파악하였다. ●는 하중이 작용되는 절점을, ○는 하중이 작용되지 않는 절점을 각각 나타낸다.

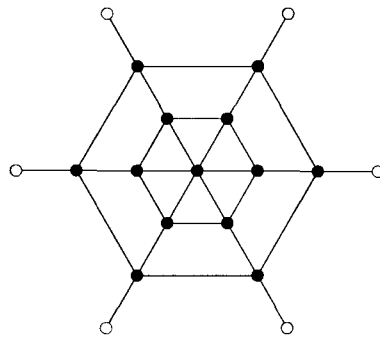
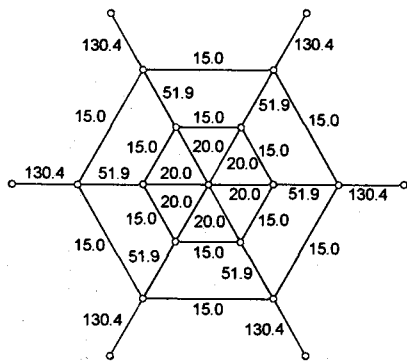
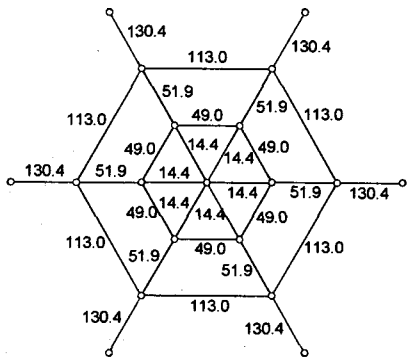


그림 3.4 하중모드

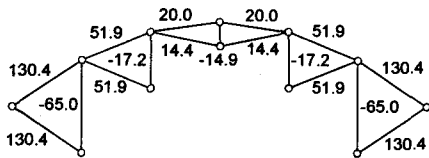
케이블 돔 구조물의 불안정 거동 특성은 초기조건에 큰 영향을 받기 때문에 조립형태가 서로 다른 두 모델을 비교하기 위해서는 초기장력레벨을 같게 해 주어야 한다. Geiger형 케이블 돔의 inner ridge 케이블의 초기장력을 기준으로 Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔의 초기장력을 산정하였으며, 각 해석모델의 초기장력 값은 그림 3.5 - 3.7과 같다.



(a) 상현 평면도

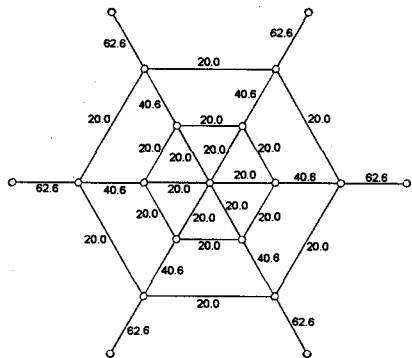


(b) 하현 평면도

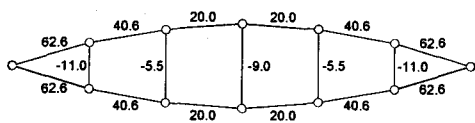


(c) 단면도

그림 35 초기응력 - Geiger (단위 : kgf)

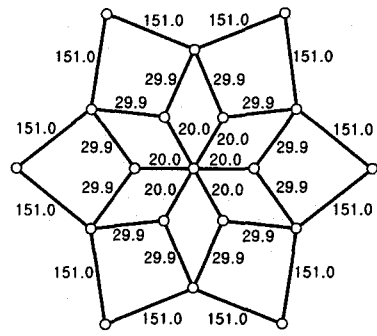


(a) 상·하현 평면도

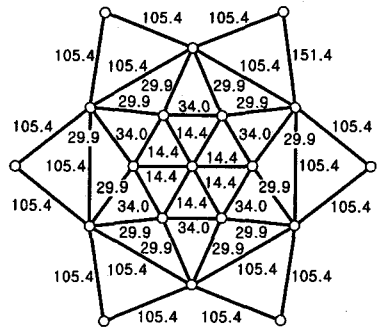


(b) 단면도

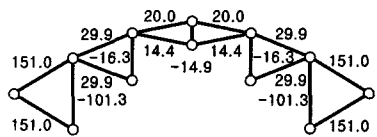
그림 36 초기응력 - Zetlin (단위 : kgf)



(a) 상현 평면도



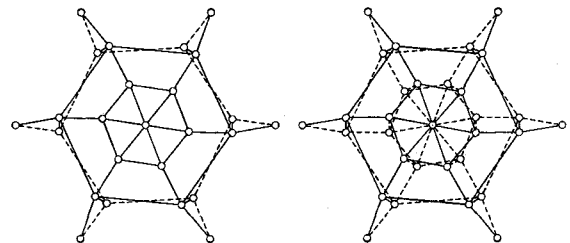
(b) 하현 평면도



(c) 단면도

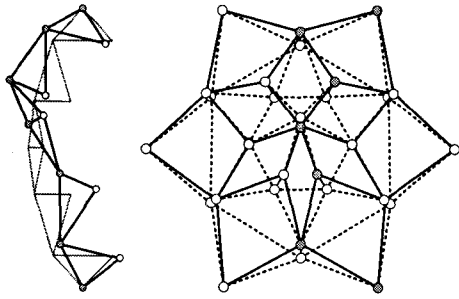
그림 37 초기응력 - Flower (단위 : kgf)

정적 불안정해석에서 분기좌굴 현상을 파악하기 위해서는 초기형상불완전을 도입해야 한다. 초기형상불완전 모드는 접선강성행렬의 초기증분에 대한 고유치 해석에서 얻은 1차 고유벡터를 선택하여 이를 초기형상불완전 모드로 하였으며 이를 나타내면 그림 3.8과 같다. 초기형상불완전의 크기는 해석모델의 span을 기준으로 하여, span의 0.01% 및 0.1%를 초기형상 불완전량으로 도입하였으며, 이들 해석 결과를 완전형상 모델의 결과와 비교하였다.



(a) Geiger형

(b) Zetlin형



(c) Flower형

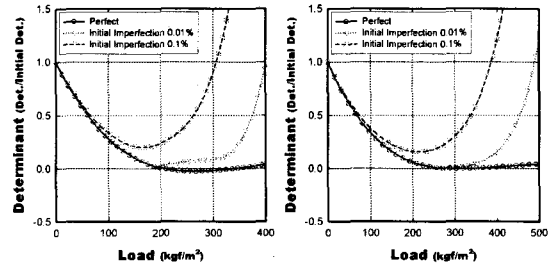
그림 3.8 초기형상불완전 모드

4. 케이블 돔의 비선형 불안정 해석

비선형 해석의 정적 해석방법으로는, 2장에서 얻은 접선강성방정식을 이용하여 step-by-step으로 해석을 수행하여 임계하중을 찾는다. 본 연구에서는 1번 절점을 -Z 방향으로 0.01cm씩 변위를 증분시켜 각 step에서의 하중계수를 구하는 변위증분법을 이용하였다.

4.1 Geiger형 케이블 돔의 불안정 거동

완전형상인 경우와 0.01%, 0.1%의 초기형상불완전을 도입하였을 경우로 각각 나누어 행렬식을 구하면 그림 4.1과 같다. 단위하중모드에서 완전형상일 경우 행렬식 값이 0을 나타내는 특이점의 하중레벨은 204.4 kgf/m²(절점당 11.84 kgf)이고, 면적비 하중모드에서는 280.4 kgf/m²이다. 초기형상불완전을 도입한 경우 초기형상불완전량이 클수록 접선강성은 특이점부근에서 회복하는 현상을 알 수 있다. 이는 초기형상불완전을 도입하면 불안정점 부근에서 새로운 좌굴모드의 출현과 함께 변형모드가 변하게 되므로 점차 강성이 안정화되어 갈 수 있기 때문이다. 또 초기형상불완전량이 클수록 강성의 안정화가 빠르게 진행되고, 두 하중모드 모두 뚜렷하게 나타난다. 특이점 부근에서 점점 강성이 약해지면서 평형궤도의 분기현상에 의해 불안정 현상이 일어남을 알 수 있다.



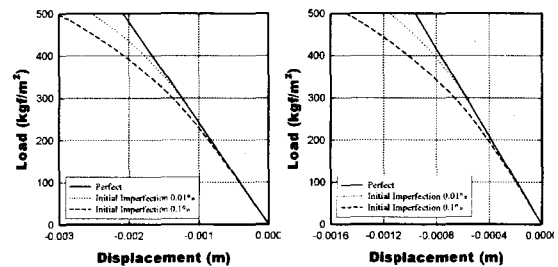
(a) 단위하중

(b) 면적비하중

그림 4.1. 하중증가에 따른 강성변화

축대칭 하중조건에서 변위증분에 따른 각 절점의 하중-변위 곡선을 이용하여 정적 해석결과를 분석한다. 돔 상부절점인 #3, #5의 Z방향 수직 변위를 하중변화에 따라 나타내면 그림 4.2와 같다. 하중의 증가에 따라 수직변위도 점차 증가하는 것을 알 수 있고, 초기형상불완전을 도입한 경우는 임계하중 부근에서 평형궤도가 바뀌는 것을 알 수 있다. 초기형상불완전이 클수록 평형궤도도 급격히 바뀌며 Softening현상을 나타낸다. 절점 #3, #4의 X방향 및 Y방향의 수평변위는 그림 4.3과 같다.

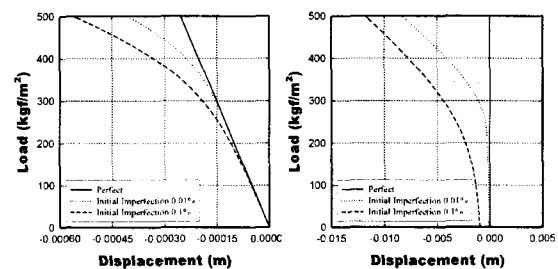
절점 #3과 #4의 X방향 변위는 서로 반대방향으로 진행하고 있고, Y방향 변위는 같은 방향으로 진행함을 알 수 있다. 즉 mast #5의 상부는 돔의 중심축방향으로 기울고, 하부는 바깥 방향으로 기울어 지며, 이로 인해 면내 비틀림이 발생됨을 알 수 있다.



(a) Node-3, Z

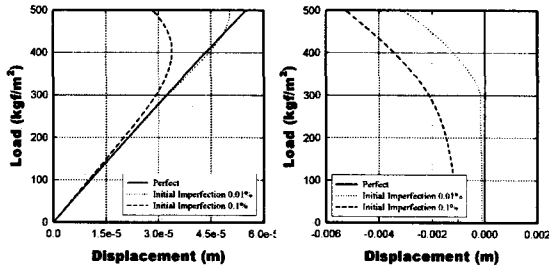
(b) Node-5, Z

그림 4.2. 수직방향 변위-하중 곡선



(a) Node-3, X

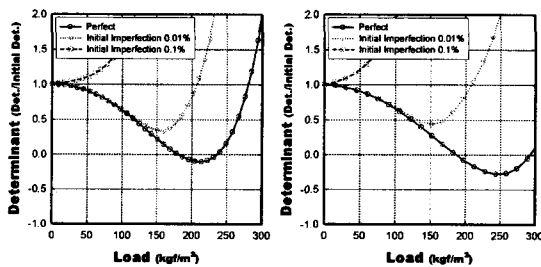
(b) Node-3, Y



(c) Node-4, X (d) Node-4, Y
그림 4.3. 수평방향 변위-하중 곡선

4.2 Zetlin형 케이블돔의 불안정 거동

완전형상인 경우와 0.01%, 0.1%의 초기형상불완전을 도입하였을 경우로 각각 나누어 행렬식을 구하면 그림 4.4와 같다. 단위하중모드에서 완전형상일 경우 행렬식 값이 0을 나타내는 특이점의 하중레벨은 182.23kgf/m²(절점당 9.77kgf)이고, 면적비 하중 모드에서는 189.72kgf/m²이다. 초기형상불완전을 도입하면 초기형상불완전량이 클수록 접선강성은 특이점부근에서 회복되는 현상을 나타낼 수 있다. 이는 초기형상불완전을 도입하면 불안정점 부근에서 새로운 좌굴모드의 출현과 함께 변형모드가 변하게 되므로 점차 강성이 안정화되어 갈 수 있기 때문이다. 또 초기형상불완전량이 클수록 강성의 안정화가 빠르게 진행되고, 두 하중모드 모두 뚜렷하게 나타난다.

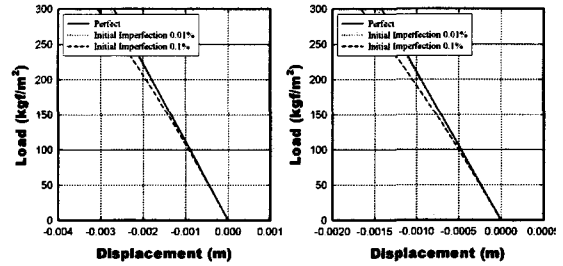


(a) 단위하중 (b) 면적비하중

그림 4.4. 하중증가에 따른 강성변화

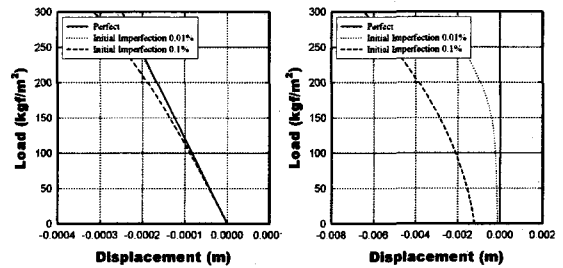
변위증분에 따른 각 절점의 하중-변위 곡선을 이용하여 정적 해석결과를 분석한다. 돔 상부절점인 #3, #5의 Z방향 수직 변위를 하중변화에 따라 나타내면 그림 4.5와 같다. 하중의 증가에 따라 수직변위도 점차 증가하는 것을 알 수 있고, 초기형상불완전을 도입한 경우는 임계하중 부근에서 평형궤도가 바뀌는 것을 알 수 있다. 불완전이 클수록 평형궤도도

급격히 바뀌며 Softening현상을 나타낸다. 절점 #3, #4의 X방향 및 Y방향의 수평변위는 그림 4.6과 같다. 절점 #3과 #4의 X방향 변위는 서로 반대방향으로 진행하고 있고, Y방향 변위는 초기에는 반대방향으로 진행하다가 임계점 부근에서 진행방향이 바뀌어 서로 같은 방향으로 진행하며 이로 인해 면내 비틀림이 발생함을 알 수 있다.

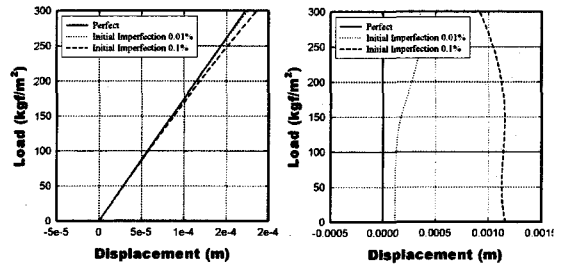


(a) Node-3, Z (b) Node-5, Z

그림 4.5. 수직방향 변위-하중 곡선



(a) Node-3, X (b) Node-3, Y



(c) Node-4, X (d) Node-4, Y

그림 4.6. 수평방향 변위-하중 곡선

4.3 Flower형 케이블돔의 불안정 거동

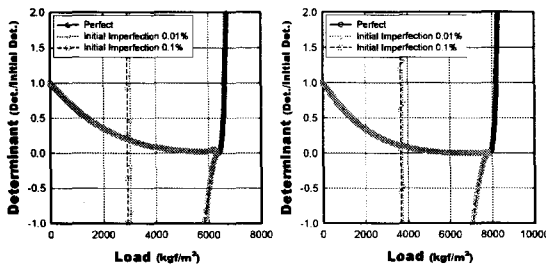
완전형상인 경우와 0.01%, 0.1%의 초기형상불완전을 도입하였을 경우로 나누어 축대칭 하중조건에서 각각의 하중모드에 따라 행렬식을 구하면 그림 4.7과 같다.

그림 4.7에서 행렬식 궤도의 특징을 살펴보면, 단위하중모드에서 완전형상일 경우 행렬식 값이 0을

나타내는 특이점의 하중레벨은 6388.86kgf/m^2 (절점당 327kgf) 이고, 면적비 하중모드에서는 7888.92kgf/m^2 이다. 단위하중모드에서 특이점의 하중레벨이 6388.86kgf/m^2 에서 나타나지만, 실은 그 전단계인 하중레벨 5599.37kgf/m^2 에서부터 0에 근접하고 있다. 이때의 행렬식은 초기값의 약 2.8%에 해당하는 값으로 구조물의 불안정을 야기 시키기에는 충분한 값이다. 이는 Geiger형, Zetlin형 케이블 돔의 점진적인 특이점에 접근과는 상이한 궤도의 특징을 나타낸다. 여기서 부터는 하중레벨 5599.37kgf/m^2 을 1차 불안정점이라 하고 하중레벨 6388.86kgf/m^2 를 2차 불안정점이라 한다.

면적비 하중모드에서는 1차 불안정점의 하중레벨은 7055.04kgf/m^2 이고 2차 불안정점의 하중레벨은 7888.92kgf/m^2 이다.

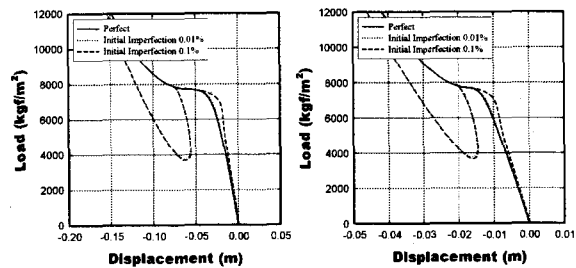
초기형상 불완전을 도입한 경우 Geiger형과 Zetlin형 케이블 돔은 특이점 근방에서 초기형상불완전량에 의해 집선강성은 점차 회복해 가는 반면, Flower형 케이블 돔의 경우 1차 불안정점에서는 회복되는 경향이 나타나지만, 2차 불안정점에서는 - 값으로 변화하고 있다.



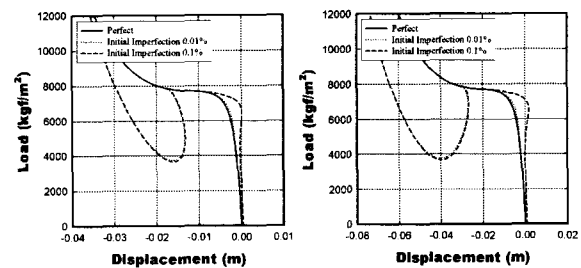
(a) 단위하중 (b) 면적비하중
그림 4.7. 하중증가에 따른 강성변화

Flower형 케이블 돔 상부 절점인 #8과 #10의 Z방향 수직변위를 하중변화에 따라 나타내면 그림 4.8과 같다. 하중의 증가에 따라 수직변위도 점차 증가하며, 초기형상불완전을 도입한 경우 1, 2차의 특이점 부근에서 평형궤도가 바뀌는 것을 알 수 있다. 1차 불안정점에서는 처음 이행경로와는 다른 방향으로 이행하고 2차 불안정점에서는 극한 하중점에서 다른 평형점으로 점프하는 현상이 나타난다. 이는 1차 불안정점은 분기좌굴현상이, 2차 불안정점은 뒤틀좌굴현상이 일어남을 알 수 있다.

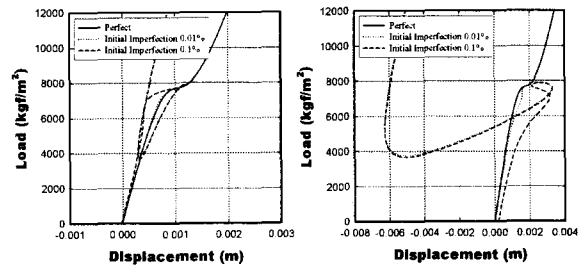
절점 #8, #9의 X 및 Y방향 수평변위는 그림 4.9와 같다. 절점 #8과 #9의 X방향 변위는 서로 반대방향으로 진행하고 있고, Y방향 변위는 초기에는 반대방향으로 진행하다가 임계점 부근에서 하부 점들의 변위 진행방향이 바뀌어 서로 같은 방향으로 진행한다. 즉 mast #8의 상부는 돔의 중심축 방향으로 기울고, 하부는 바깥방향으로 기울고 있다. 그리고 변위 진행상태를 고찰해 볼 때 center mast가 하중방향으로 큰 이행을 하고 어느 순간 center mast의 상부절점이 +Y방향으로 이동하면서 구조물 전체가 +Y방향으로 쏠리는 현상이 나타난다. Flower형 케이블 돔 구조물은 1, 2차에 걸쳐서 불안정점이 나타나지만 불안정점들이 큰 하중레벨에서 변형의 order가 클 때 나타나고 특히 2차 불안정점의 하중레벨은 설계하중레벨과는 매우 멀리 떨어져 있음을 알 수 있다.



(a) Node-8, Z (b) Node-10, Z
그림 4.8. 수평방향 변위-하중 곡선



(a) Node-8, X (b) Node-8, Y



(c) Node-9, X (d) Node-9, Y
그림 4.9. 수직방향 변위-하중 곡선

5. 결론

본 연구에서는 인장재와 압축재를 연속적으로 이용하여 경량화 한 케이블 돔 구조시스템인 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔을 대상으로 정적 불안정 거동 특성을 분석하였다.

- 1) Geiger형 케이블 돔과 Zetlin형 케이블 돔 구조물의 불안정 현상은 평형계도의 분기좌굴(bifurcation)현상에 의해 일어난다.
- 2) Flower형 케이블 돔 구조물은 1, 2차의 불안정 현상으로 구분되어 나타난다. 1차 불안정점에서는 분기좌굴현상이, 2차 불안정점에서는 뿔좌굴(snap-through)현상이 일어난다. 이때 뿔좌굴은 국부적으로 일어나며 이로 인해 구조물 전체의 쓸림현상을 야기 시킨다.

그리고 본 연구에서 채택한 대표적인 3개의 케이블 돔을 안정성 측면에서 비교·분석한 결과 Geiger형 및 Zetlin형 구조시스템의 불안정 거동 특성인 면내 비틀림 현상을 보완한 Flower형 구조시스템이 보다 안정적인 구조시스템임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 林曉光, 複合ケーブル構造の構造安定解析, 修士學位論文, 東京大學, 1990.
2. 金勝德, 偏平構造物の動的安定に関する研究, 博士學位論文, 東京大學, 1990.
3. Kim, S. D. and Hangai, Y. "Direct and indirect snappings of shallow E.P. shells under the up-and-down earthquake excitation," Proceedings of International IASS Symposium 91, Copenhagen, 1991, Vol. 3,
4. 鍾國強, 幾何學的非線形性構造物系および彈性物に支特された構造系の分岐解析法, 博士學位論文, 東京大學, 1994.
5. Hangai, Y. and Kawamata, S., "Nonlinear analysis of space frames and snap-through buckling of reticulated shell structures," Proceedings of the Pacific Symposium-Part II On Tension Structures and Space Frames, Tokyo and Kyoto, 17-23, October 1971, pp. 9-4.
6. Kim, S. D., Tanami, T. and Hangai, Y. "Direct and indirect snapping behaviors of shallow truss models," Bull. ERS, No.23, 1990, pp.73-86
7. Kim,S.D., Kim,H.S. and Kang,M.M., "A Study of the Nonlinear Dynamic Instability of Hybrid Cable Dome Structures," Structural Engineering and Mechanics, Vol.15, No.6, 2003.6., pp.653-668.(SCI)
8. 김승덕, 백인성, 김형석, "축대칭 하중을 받는 Hybrid 케이블 돔의 Bifurcation 특성에 관한 연구," 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제16권, 제2집, 2003.10., pp.277-284.
9. Seung-Deog Kim, "On the Membrane Collapse of Jeju World Cup Stadium by Typhoon," International Symposium on New Perspectives for of Shell and Spatial Structures, editors by Y. B. Yang, L. J. Leu, C. S. Chen, S. H. Hsieh, and Y. S. Lee, Taipei, 2003.10., pp.60.
10. S. D. Kim, I. S. Baek, W. K. Song, K. G. Park, and T. J. Kwun, "Characteristics of Nonlinear Unstable Phenomenon According to the Shape Variation of Cable Domes," International Symposium on New Perspectives for of Shell and Spatial Structures, editors by Y. B. Yang, L. J. Leu, C. S. Chen, S. H. Hsieh, and Y. S. Lee, Taipei, 2003.10., pp.90.
11. H. S. Kim, S. D. Kim, M. M. Kang, I. K. Jo, and S. G. Lee, "A Study on the Dynamic Instability of Zetlin-Type Cable Dome," International Symposium on New Perspectives for of Shell and Spatial Structures, editors by Y. B. Yang, L. J. Leu, C. S. Chen, S. H. Hsieh, and Y. S. Lee, Taipei, 2003.10., pp.136.