

구조시스템에 따른 Tensegrity형 케이블 돐의 정적 불안정 거동특성

The Static Unstable Characteristics of Tensegrity-Type Cable Dome according to the Structural System

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

요약

대공간 구조는 3차원적인 힘의 흐름과 면내력에 의해 외부하중에 대한 저항능력을 확보하는 형태저항형 구조로서, 기본적인 구조저항 메커니즘은 구조물 자체의 곡률을 이용하여 면외방향으로 작용하는 외력을 주로 면내력으로 저항할 수 있게 한 구조시스템이다. 따라서 최소의 재료로, 가볍고 얇게 대공간을 만들 수 있는 장점이 있다. 대공간 구조시스템 중 연성 구조물의 일종인 막 구조, 케이블 구조 또는 복합 구조체로서의 막-케이블 구조물의 비약적인 발전이 최근 주목을 끌고 있다. 즉, 기존의 일반 구조체보다 가볍고 축 강성은 강하나 휨 강성은 매우 작은 막 및 케이블을 사용하여 대공간 구조물을 보다 효과적으로 구축할 수 있는 구조시스템을 말한다. 그러나, 이러한 구조물은 하중 레벨이 어느 임계값에 도달하면 구조물의 형상에 따라 뿔좌굴(snap-through) 또는 분기좌굴(bifurcation)에 의한 불안정 현상이 일어나며, 이로 인한 파괴 메커니즘의 파악은 구조설계에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 텐세그리티형 케이블 돐 구조물의 구조시스템에 따른 정적 불안정 거동 특성을 파악하기 위해 먼저, 형상해석을 통해 복합 케이블 돐 구조물인 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 케이블 돐 구조물의 초기응력에 의한 형상을 결정하고, 형상해석 결과를 기준으로 하여 정적 외력에 의한 불안정 문제를 파악하고자 한다.

Abstract

A shell structure, having a curvature with a curved surface, is an extremely efficient mechanical creation regard to the external load. A basic structural resistance mechanism is the structural system, which is resisted the out-of-plane direction load by in-plane forces using the structure's curvature. Therefore, it has a merit to make thin and lightweight large spacial structures using minimum materials. Among the large space structural system, the rapid development of the membrane structures, cable structures and the hybrid structures are watched recently. But, this kind of structural system shows the unstable phenomenon by snap-through or bifurcation according to the shape of structure, and the understanding of the collapse mechanism by this phenomenon is very important to the design process.

In this study, I investigated the unstable characteristics of the Geiger-type, Zetlin-type and Flower-type hybrid cable dome structures, which is the lightweight hybrid structures using compression and tension elements continuously, according to the difference of structural system.

키워드: 복합구조 케이블 돐, 불안정, 비선형, 분기좌굴, 초기형상불완전
keywords: Hybrid Cable Dome, Instability, Nonlinear, Bifurcation, Initial Imperfection

1. 서론

- * 선린대학 건축조형계열, 조교수
Tel : 054-260-5643 E-mail : inkjo@sunlin.ac.kr
- ** 경북대학교 건축공학과, 연구원, 공학박사
E-mail : hskim90@bcline.com
- *** 세명대학교 건설공학부, 부교수
E-mail : sabinus@semyung.ac.kr
- **** 경북대학교 건축학부, 교수
E-mail : kmm@bh.knu.ac.kr

대공간 구조는 3차원적인 힘의 흐름과 면내력에 의해 외부하중에 대한 저항능력을 확보하는 형태저항형 구조로서, 기본적인 구조저항 메커니즘은 구조물 자체의 곡률을 이용하여 면외방향으로 작용하는 외력을 주로 면내력으로 저항할 수 있게 한 구조시스템이다. 따라서 최소의 재료로, 가볍고 얇게 대공간을 만들 수 있는 장점이 있다.

인장재 케이블과 다른 구조 요소들을 조합하고 장력을 도입한 복합(hybrid) 구조 시스템은 최초 R.B. Fuller^[1]에 의해, 압축재의 수를 줄이고 인장재를 케이블로 사용하여 구조 시스템의 경량화, 합리화를 위하여 시도되었던 구조로 A. Motro, O. Vilnay, F. Otto 등에 의해 지속적인 연구가 이루어졌다.^[3,9,10]

국내에서의 복합 케이블 돔 구조물에 대한 연구는 90년대 중반부터 최적의 형상을 찾아내는 여러 가지 연구들이 소개되면서 발전하였다. 김승덕은 기하학적 비선형 이론을 도입한 유한요소법을 이용하여, 수렴성 향상을 위한 복합적 수치해석 기법에 의한 해석 프로그램을 개발하고, 최적의 자기 평형 상태를 갖는 초기장력에 관한 선정방법을 제안하였다. 그 후 이러한 구조물의 붕괴 메커니즘 파악의 필요성에 의해 케이블 돔의 구조거동 특성에 관한 연구가 몇몇 연구자에 의해 보고된 바가 있으며, 88 서울 올림픽 체조경기장의 붕괴 사고로 이러한 연구는 더욱 가속화되고 있다. 김승덕은 케이블 돔의 구조거동의 특성을 살피기 위해 초기형상불완전을 도입하여 정적 및 동적 불안정 현상을 분석하였으며, 한상일은 동적이완법을 적용하여 케이블 돔의 안정화 이행과 정적, 동적 외력에 의한 구조물의 거동 특성에 관한 연구를 보고하고 있다.^[16-26]

인장재로 케이블을, 압축재로 강봉등을 이용하여 만들어진 텐세그리티 구조의 일종인 케이블 돔은 시공성, 경제성을 향상시킨 매우 합리적인 구조 시스템이다. 하지만 이러한 연성 구조물은 강성 구조물과는 다른 구조적 특성을 지닌다.^[2,4,5,6]

강성 구조물은 외력에 의해 안정 영역에서 불안정 영역으로 이행하며, 연성 구조물은 불안정 영역에서 안정 영역으로 이행한다. 연성 구조물은 초기 강성이 매우 약하며, 초기강성을 확보하기 위해서는 초기장력의 도입이 필수적이다. 즉, 연성구조 시스템인 막 구조물, 케이블 구조물 및 이들의 복합 구조체인 복합 구조물은 초기강성을 갖기 전에는 불안정 현상을 나타내지만 초기강성의 도입과 함께 안정상태가 된다.^[7,8,12,13,14]

따라서, 이러한 구조물은 하중 레벨이 어느 임계값에 도달하면 구조물의 형상에 따라 뿔좌굴(snap-

through) 또는 분기좌굴(bifurcation)에 의한 불안정 현상이 일어나며, 이로 인한 파괴 메커니즘의 파악은 구조설계에서 매우 중요하다.

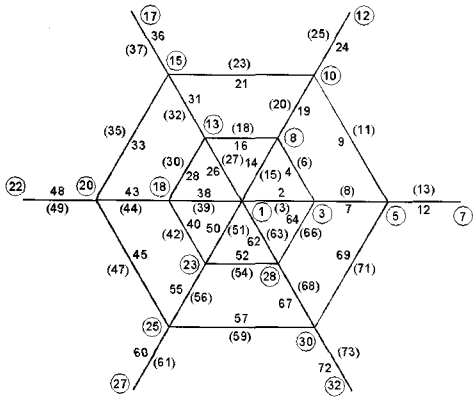
본 연구에서는 텐세그리티형 케이블 돔 구조물의 구조시스템에 따른 정적 불안정 거동 특성을 파악하기 위해 복합 케이블 돔 구조물인 Geiger형^[11], Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔 구조물의 초기응력에 의한 형상을 결정하고, 형상해석 결과를 기준으로 하여 정적 외력에 의한 불안정 거동특성을 파악하고자 한다. 케이블 돔 구조물의 불안정 거동은 하중조건에 의해서도 민감하게 반응하므로 두 가지 형태의 하중모드를 사용하여 서로 다른 하중모드 하에서의 불안정 거동특성을 파악하고자 한다. 또한, 셸형 구조물의 구조불안정 거동이 초기조건에 매우 민감하게 반응하므로 초기형상불완전을 도입하여 초기조건에 의한 영향도 알아보았다.

2. 해석모델

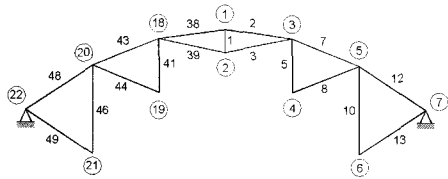
조립형태가 서로 다른 세 가지 복합 케이블 돔 구조물을 대상으로 하여 복합 케이블 돔 구조물의 정적 불안정 거동특성을 알아보하고자 한다. 해석대상 모델은 각각 Geiger형, Zetlin형 그리고 Flower형 구조시스템이다.

Geiger형 케이블 돔은 대공간 구조물을 건설하기 위해 구조시스템을 보다 경량화하여 안정성 및 경제성을 향상시킨 것으로, 88 서울올림픽 체조경기장을 시초로 세계 각국에서 많이 이용하고 있는 구조시스템이며, Zetlin형 케이블 돔은 Geiger형 케이블 돔의 경사 케이블 대신에 하부 리지 케이블을 사용하여 조립된 형태를 가진다. 하지만 이러한 구조물은 경량이고 유연하므로, 면내 비틀림으로 인한 붕괴의 위험성이 있다. 세 번째 해석모델인 Flower형 케이블 돔은 Geiger형과 Zetlin형 케이블 돔의 면내 비틀림으로 인한 붕괴의 위험성을 보완하기 위한 조립형태를 취하고 있다.

이러한 서로 다른 조립형태를 가지고 있는 케이블 돔 구조물들의 정적 불안정 거동특성을 파악하기 위해 두 가지 형태의 하중조건 하에서의 거동을 분석하였다.

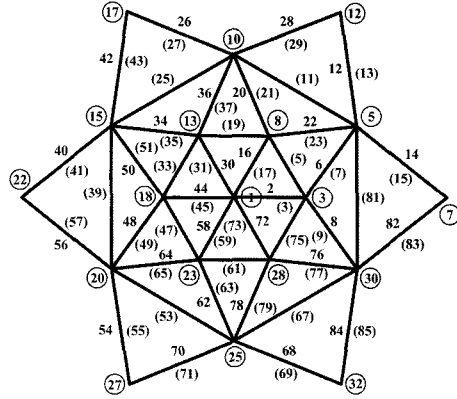


(a) 평면도

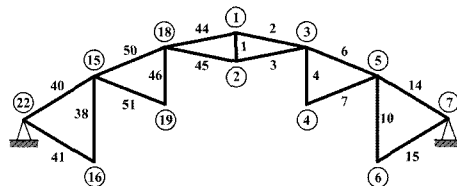


(b) 단면도

<그림 1> Geiger형 케이블 돔

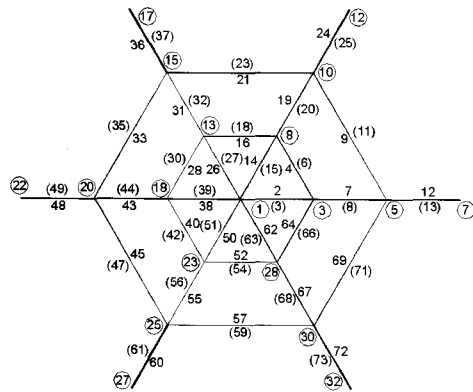


(a) 평면도

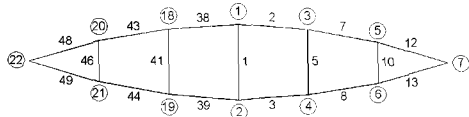


(b) 단면도

<그림 3> Flower형 케이블 돔



(a) 평면도



(b) 단면도

<그림 2> Zetlin형 케이블 돔

각각의 해석모델의 절점번호와 요소번호는 그림 1~3과 같고, 각 절점의 좌표는 표 1과 같다.

각 부재의 단면적은 표 2와 같고 해석에 사용된 물성치는 다음의 구조용 스트랜드 로우프의 값을 사용하였다.

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

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

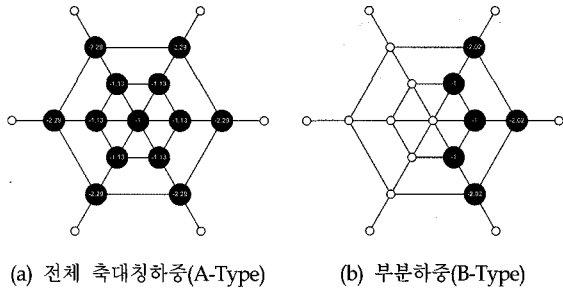
경계조건은 외곽의 절점들, 즉 7, 12, 17, 22, 27, 32 등 6개 절점을 고정시키고, 나머지 절점은 자유로 하였다.

<표 1> 절점좌표 (단위 : cm)

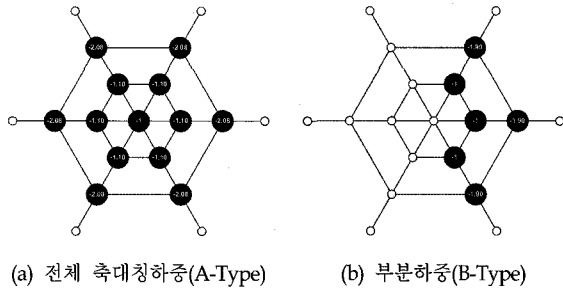
절점번호		1	2	3	4	5	6	7
Geiger	X 좌표	0.0	0.0	20.0	20.0	40.0	40.0	60.0
	Z 좌표	21.0	15.0	18.5	4.50	11.5	-11.5	0.0
Zetlin	X 좌표	0.0	0.0	20.0	20.0	40.0	40.0	60.0
	Z 좌표	11.0	-11.0	9.5	-9.5	6.0	-6.0	0.0
Flower	X 좌표	0.0	0.0	20.0	20.0	34.6	34.6	60.0
	Z 좌표	21.0	15.0	18.5	4.50	11.5	-11.5	0.0

<표 2> 부재의 단면적 (단위 : cm^2)

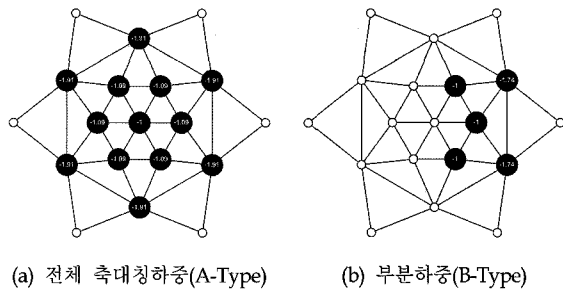
Geiger	부재번호	1	2	3	4	5	6	7	8
	단면적	1.00	0.01	0.01	0.01	1.00	0.02	0.02	0.02
	부재번호	9	10	11	12	13			
Zetlin	부재번호	1	2	3	4	5	6	7	8
	단면적	1.0	0.01	0.01	0.01	1	0.02	0.02	0.02
	부재번호	9	10	11	12	13			
Flower	부재번호	1	2	3	4	5	6	7	8
	단면적	1.00	0.01	0.01	1.00	0.02	0.02	0.02	0.02
	부재번호	9	10	11	12	13	14	15	
	단면적	0.02	1.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	



〈그림 4〉 하중모드 (Geiger형)



〈그림 5〉 하중모드 (Zetlin형)

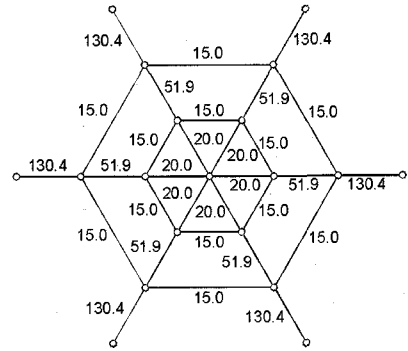


〈그림 6〉 하중모드 (Flower형)

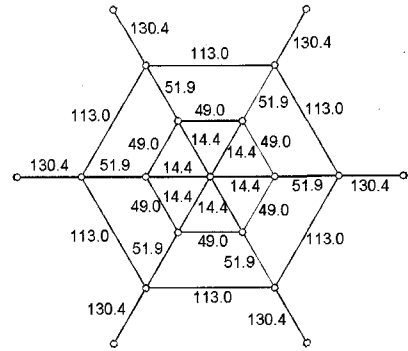
하중조건은 그림 4~6과 같이 각각의 해석모델에 두 가지 형태의 하중 모드를 사용하였다. 하중비는 각각의 하중절점이 부담하는 면적의 비로 하는 면적비 하중모드를 사용하였다.

케이블 돔 구조물은 초기 불안정 구조물이므로 구조물의 안정화를 위해 초기응력을 도입해야 한다. 이러한 구조물은 초기응력의 상태가 구조물의 불안정 현상에 크게 작용한다. 따라서 최적의 초기 응력 값을 찾는 것은 매우 어려운 문제 중의 하나이다.

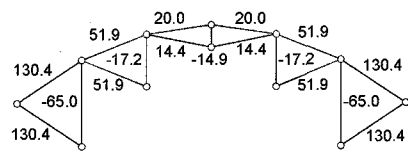
케이블 돔 구조물의 불안정 거동특성은 초기조건에 큰 영향을 받기 때문에 조립형태가 서로 다른 모델을 비교하기 위해서는 초기응력 레벨을 같게 해주어야 한다. Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔의 초기응력은 Geiger형 케이블 돔의 내부 링 부분의



(a) 상현 평면도

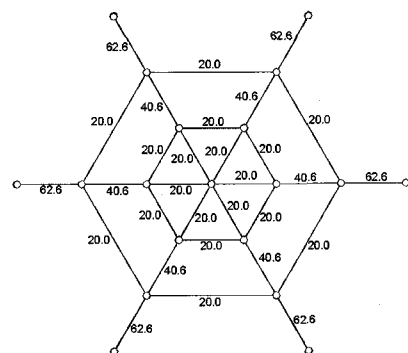


(b) 하현 평면도

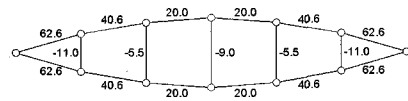


(c) 단면도

〈그림 7〉 초기응력 (Geiger형, 단위 : kgf)



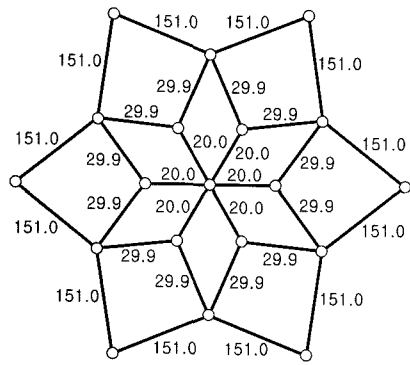
(a) 상하현 평면도



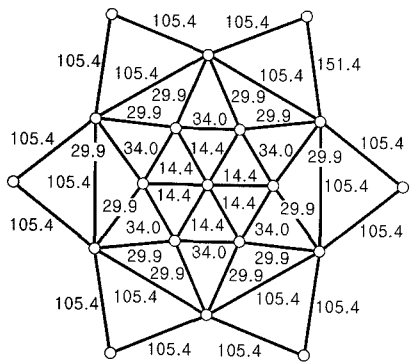
(b) 단면도

〈그림 8〉 초기응력 (Zetlin형, 단위 : kgf)

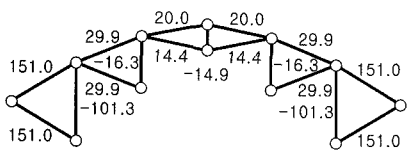
상현케이블의 초기응력 값을 기준으로 산정한 값이



(a) 상면 평면도

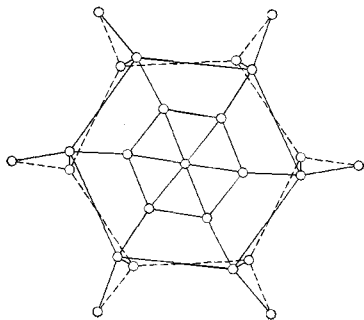


(b) 하면 평면도



(c) 단면도

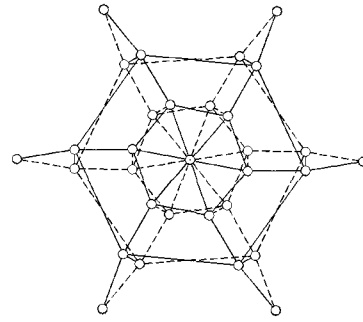
〈그림 9〉 초기응력 (Flower형, 단위 : kgf)



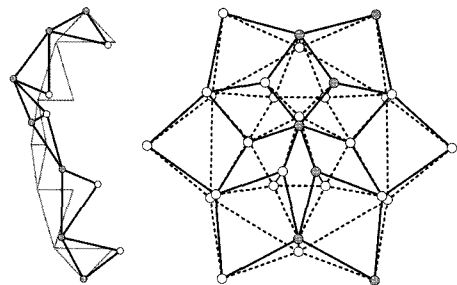
〈그림 10〉 초기형상불완전 모드 (Geiger형)

Geiger형 케이블 돔과 가장 작은 오차를 보였으며, 이 값을 초기응력 값으로 하였고 그 크기는 그림 7~9와 같다.

정적 불안정해석에서 분기좌굴 현상을 파악하기 위해서는 초기형상불완전을 도입해야 한다. 초기형상불완전 모드는 접선강성행렬의 초기증분에 대한 고유치 해석에서 얻은 1차 고유벡터를 선택하여 이



〈그림 11〉 초기형상불완전 모드 (Zetlin형)



〈그림 12〉 초기형상불완전 모드 (Flower형)

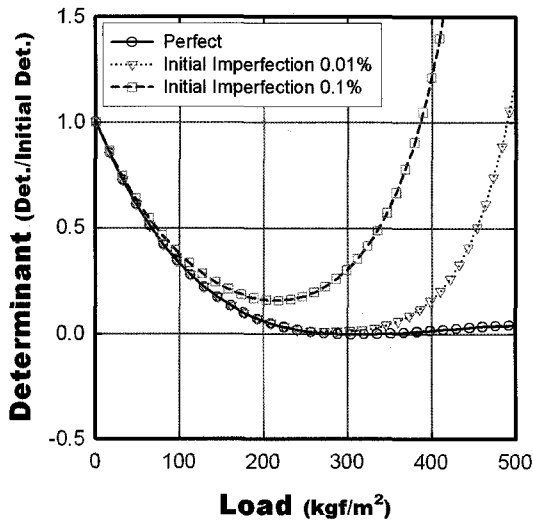
를 초기형상불완전 모드로 하였다.

각각의 해석모델에 대한 초기형상불완전 모드는 그림 10~12와 같다. 그리고 초기형상불완전의 크기는 해석모델의 경간을 기준으로 하여, 경간의 0.01% 및 0.1%를 초기형상불완전량으로 도입하였으며, 이들 해석결과를 완전형상 모델의 결과와 비교하였다.

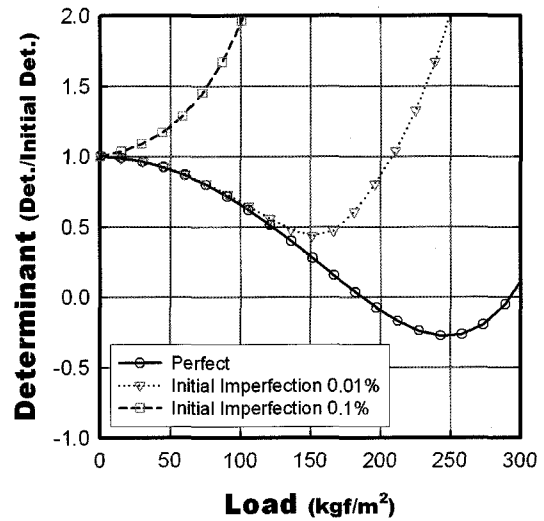
3. 케이블 돔 구조물의 불안정 거동

비선형 해석의 정적 해석방법으로는 접선강성방정식을 이용하여 1번 절점을 $-Z$ 방향으로 0.01cm 씩 변위를 증분시켜 각 구간에서의 하중계수를 구하는 변위증분법을 이용하였다. 정적 임계하중을 구하기 위해 접선강성행렬의 행렬식을 각 증분 구간에서 구하였다. 각각의 해석모델에 대해 하중모드별로 완전형상인 경우와 0.01%, 0.1%의 초기형상불완전을 도입하였을 경우로 나누어 행렬식을 구하면 그림 13~15와 같다.

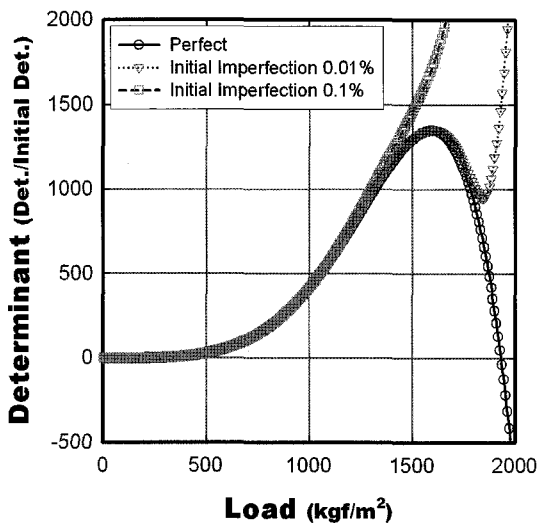
Geiger형 케이블 돔의 해석결과 완전형상 모델의 경우에 행렬식 값이 0을 통과하는 하중레벨은 A-type에서는 279.43 kgf/m^2 이고, B-type에서는



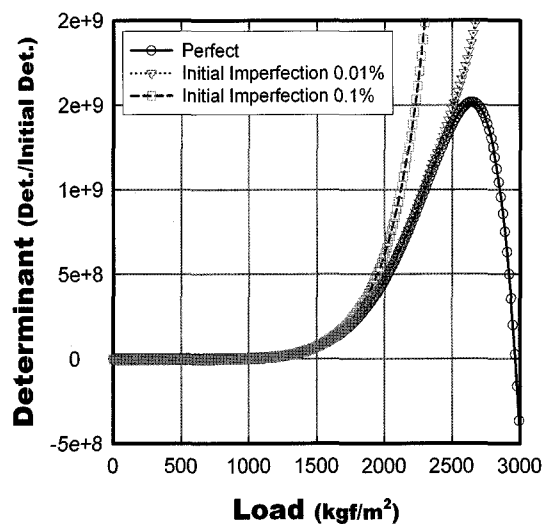
(a) A-Type



(a) A-Type



(b) B-Type



(b) B-Type

〈그림 13〉 접선강성의 행렬식 (Geiger형)

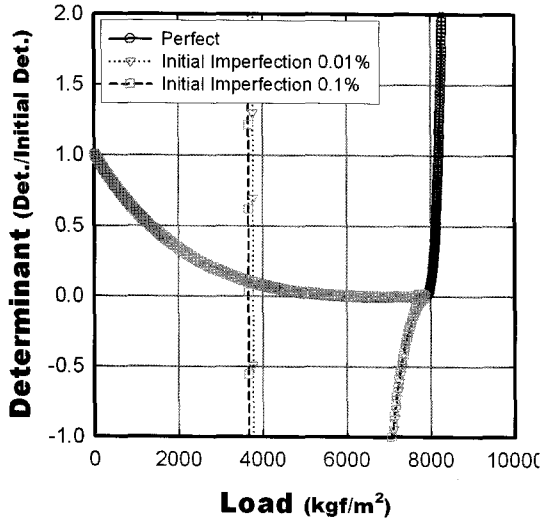
1931.15 kgf/m²임을 알 수 있으며 이 값이 정적 분기좌굴하중이다.

A-type의 경우 초기형상불완전을 도입한 경우는 행렬식 값이 0을 향해 접근하다 0 부근에서 되돌아가는 것을 알 수 있고, 초기형상불완전이 클수록 이러한 현상은 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 완전형상 모델에서는 평형궤도에서 불안정 점이 나타나더라도 피할 수 없으므로 0점을 통과하게 되고, 초기형상불완전을 도입하면 불안정 점 부근에서 새로운 직교좌굴모드의 출현과 함께 변형모드가 변하게 되므로 점차 강성이 안정화해 갈 수 있기 때문이다.

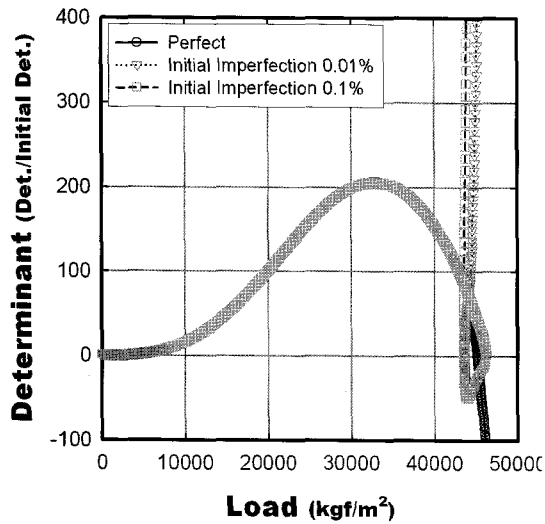
〈그림 14〉 접선강성의 행렬식 (Zetlin형)

B-type의 경우 재하 초기에는 완전형상 모델과 초기형상불완전을 도입한 경우 모두 행렬식 값이 증가하다가 완전형상 모델에서는 하중레벨 1595.77 kgf/m²에서 극값을 나타낸 후 1931.15 kgf/m²에서 행렬식 값이 0을 나타내며, 초기형상불완전을 도입한 경우는 다시 행렬식 값이 증가함을 알 수 있다.

그림 14는 Zetlin형 케이블 돔의 비선형 해석 결과이다. Zetlin형 케이블 돔의 정적 분기좌굴 하중은 A-type에서는 189.72 kgf/m²이고, B-type에서는 2969.59 kgf/m²임을 알 수 있다.



(a) A-Type



(b) B-Type

〈그림 15〉 접선강성의 행렬식 (Flower형)

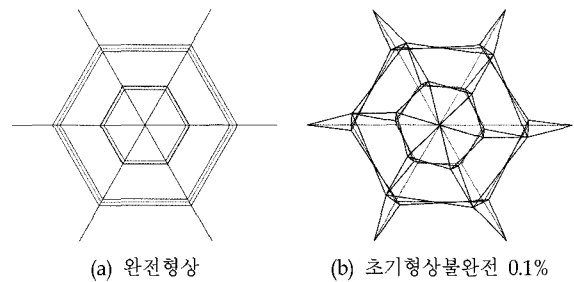
A-type에서 초기형상불완전을 도입한 경우는 Geiger형 케이블 돔과 유사하게 행렬식 값이 0을 향해 접근하다 0 근방에서 되돌아가는 것을 알 수 있다. B-type의 경우 하중이 증가함에 따라서 행렬식 값도 증가하다가 완전형상 모델에서는 하중레벨 2639.51 kgf/m²에서 극값을 나타낸 후 행렬식 값이 감소하여 2969.59 kgf/m²에서 0점을 통과하게 되며, 초기형상불완전을 도입한 경우에는 하중이 증가함에 따라 행렬식 값도 함께 증가한다.

그림 15는 Flower형 케이블 돔의 비선형 해석결과이다. A-type의 경우 완전형상일 경우 행렬식 값

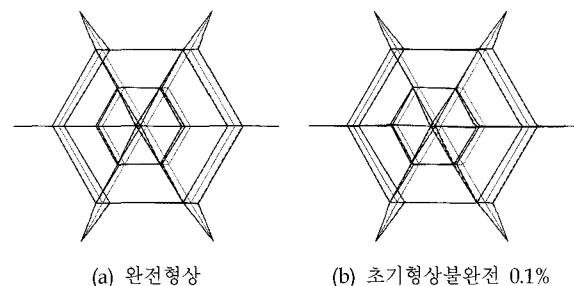
이 0을 나타내는 하중레벨은 7888.92 kgf/m²이다. 특이점의 하중레벨은 7888.92 kgf/m²에서 나타나지만, 실은 그 전단계인 하중레벨 7055.04 kgf/m²에서부터 0에 근접하고 있다. 이때의 행렬식은 초기값의 약 0.11%에 해당하는 값으로 구조물의 불안정을 일으키기에 충분한 값이다. 초기형상불완전을 도입한 경우 전체 축대칭하중 모드에서 Geiger형 및 Zetlin형 케이블 돔은 특이점 근방에서 초기형상불완전량에 의해 접선강성은 점차 회복해 가는 반면, Flower형 케이블 돔의 경우 1차 불안정점에서는 회복되는 경향이 나타나지만, 2차 불안정점에서는 (-)값으로 변화하고 있다. B-type의 경우 행렬식 계도의 특징을 살펴보면, 완전형상 모델과 초기형상불완전을 도입한 경우 모두 하중레벨이 증가함에 따라 행렬식도 증가하다가 하중레벨 32778.02 kgf/m²에서 극값에 도달한 후 행렬식이 감소하여 46213.18 kgf/m²에서 0을 통과한다.

4. 구조시스템별 불안정거동의 특성

본 장에서는 3장의 해석결과를 바탕으로 서로 다른 조립형태를 가지는 각각의 해석모델이 각각의 하중조건에서 어떠한 형태의 메커니즘에 의해 불안정 현상이 발생하는지를 비교·분석하였다.



〈그림 16〉 Geiger형 케이블 돔 (A-Type)



〈그림 17〉 Geiger형 케이블 돔 (B-Type)

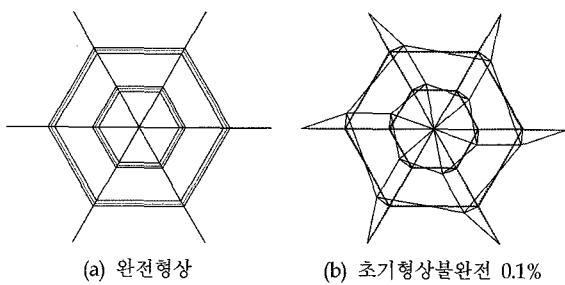
그림 16, 17은 각각의 하중모드에서 Geiger형 케이블 돔의 임계하중 레벨에서의 변형된 형상을 나타내고 있다.

A-type의 경우 완전형상 모델에서는 면내비틀림 현상은 발생하지 않지만 초기형상불완전을 도입한 경우에는 하중모드와는 다른 새로운 직교 좌골모드와 연성하게 되어 면내비틀림 현상이 발생함을 알 수 있다.

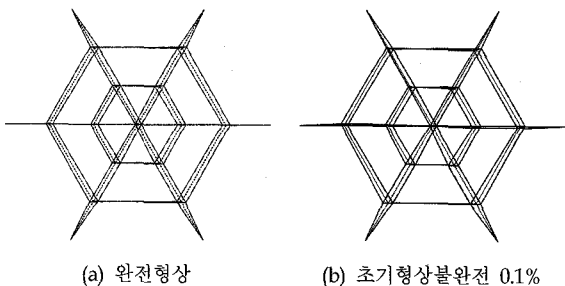
B-type에서는 완전형상 모델과 초기형상불완전을 도입한 경우 모두 하중이 증가함에 따라 초기형상불완전 모드보다는 하중모드에 의해 변형이 진행되어 구조물 전체가 (-)X방향으로 밀리는 현상이 발생한다. 그리고 완전형상 모델의 경우 행렬식 값이 0을 통과하나 초기형상불완전을 도입한 경우는 하중이 증가함에 따라 미약하지만 면내비틀림 현상이 발생하게 되어 강성이 다시 안정화됨을 알 수 있다.

그림 18, 19는 Zetlin형 케이블 돔의 임계하중 레벨에서의 변형된 형상을 나타낸다.

A-type에서는 Geiger형 케이블 돔과 유사하게 완전형상 모델의 경우 면내비틀림 현상이 발생하지 않지만 초기형상불완전을 도입한 경우에는 하중모드와는 다른 새로운 직교 좌골모드와 연성하게 되어 면내비틀림 현상이 발생함을 알 수 있다.



〈그림 18〉 Zetlin형 케이블 돔 (A-Type)



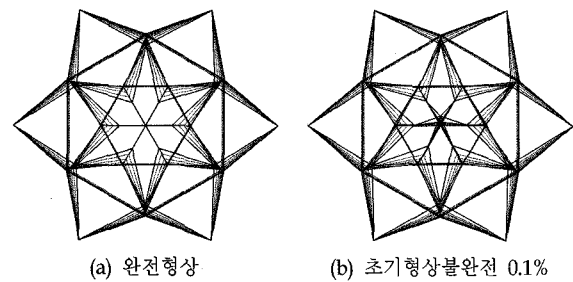
〈그림 19〉 Zetlin형 케이블 돔 (B-Type)

B-type에서도 Geiger형 케이블 돔과 유사하게 완전형상 모델과 초기형상불완전을 도입한 경우 모두 하중이 증가함에 따라 초기형상불완전 모드보다는 하중모드에 의해 변형이 진행되어 구조물 전체가 (-)X방향으로 밀리는 현상이 발생함을 알 수 있다. 완전형상 모델의 경우에는 면내비틀림 현상이 발생하지 않으므로 행렬식 값은 0을 통과하게 되지만 초기형상불완전을 도입한 경우는 하중이 증가함에 따라 미약하지만 면내비틀림 현상이 발생하게 되어 강성이 다시 안정화된다.

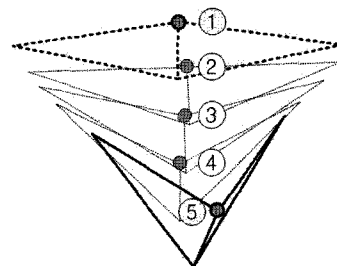
그림 20, 22는 Flower형 케이블 돔의 임계하중 레벨에서의 변형된 형상을 나타낸다.

A-type에서 완전형상 모델의 경우 하중이 증가함에 따라 수직변위는 점차 증가하며 상부절점은 돔의 중심축 방향으로 수축하고 하부절점은 팽창하고 있다. 초기형상불완전을 도입한 경우 완전형상 모델의 경우와 비슷한 거동을 보이나 임계하중 레벨을 지나면서 마스트 #1이 (+)Y방향으로 갑자기 쏠리는 현상이 발생하여 돔의 내부 링 부분에 국부적으로 뒤틀림 현상이 발생하게 된다. 이때의 절점 #1의 변위의 진행양상을 확대하여 나타내면 그림 21과 같다.

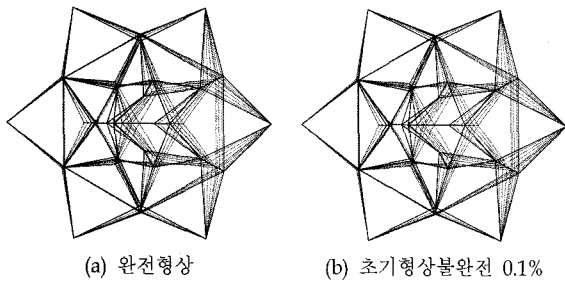
B-type에서는 완전형상 모델과 초기형상불완전을 도입한 경우 모두 하중모드를 따라서 변형이 진행된다. 하지만 절점 #15의 Z방향 변위가 초기에는



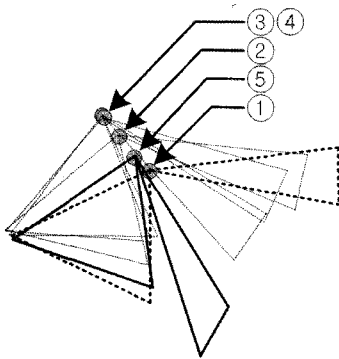
〈그림 20〉 Flower형 케이블 돔 (A-Type)



〈그림 21〉 절점 #1의 변위의 진행양상



(a) 완전형상 (b) 초기형상불완전 0.1%
 <그림 22> Flower형 케이블 돔 (B-Type)



<그림 23> 절점 #15의 변위의 진행양상
 하중모드에 의해 (+)Z방향으로 진행하다가 임계하중 레벨을 지나면서 돔의 좌측 부분에 국부적으로 뒹좌굴 현상이 발생하여 갑자기 (-)Z방향으로 이동한다. 이때의 절점 #15의 변위의 진행양상을 확대하여 나타내면 그림 23과 같다.

5. 결론

본 논문에서는 인장재와 압축재를 연속적으로 이용하여 경량화한 텐세그리티형 케이블 돔 구조시스템 중 구성방식이 서로 다른 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔을 대상으로 구조시스템에 따른 불안정 거동특성을 알아보았다.

본 논문에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. Geiger형과 Zetlin형 케이블 돔은 A-type과 B-type의 하중모드에서 완전형상 모델에서는 평형 궤도 상에서 불안정점을 찾을 수 없으나 초기형상 불완전을 도입하면 불안정점 부근에서 새로운 직교 좌굴모드의 출현과 함께 평형궤도가 바뀐다.

2. Flower형 케이블 돔은 A-type에서 1, 2차의 불안정 현상으로 구분되어 나타난다. 1차 불안정점에서는 분기좌굴 현상이, 2차 불안정점에서는 뒹좌굴 현상이 일어난다. 이때 뒹좌굴은 국부적으로 일

어나며 이로 인해 구조물 전체의 쓸림현상을 야기시킨다. B-type에서는 초기에는 강성이 모두 증가하다가 돔의 좌측 부분에서 국부적으로 뒹좌굴 현상이 발생하여 구조물이 전체적으로 (-)X방향으로 쓸리게 된다.

케이블 돔 구조시스템은 부재의 구성방식에 따라 불안정 현상의 발생경로가 서로 다르게 나타나며 임계하중 레벨 또한 매우 크게 차이가 날 수 있었다. 그리고 하중모드에 의해서도 서로 다른 거동을 보이며 불안정 현상이 발생하고 있다.

따라서 텐세그리티형 케이블 돔의 설계시 구조시스템의 결정에 앞서 케이블 돔의 구조시스템과 하중모드에 대한 거동의 민감성을 고려하여 설계에 반영해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Fuller, R. B., Tensile-Integrity Structure, U. S. Pat. 3, 3, 063, 521, 1962
2. Siev, A. and Eidelman, J., "Shapes of Suspended Roofs," Proc. of the IASS Colloquium on Hanging Roofs, 1962, pp.42-47
3. Otto, F. TENSILE STRUCTURES, Vol. I, II, MIT Press, Cambridge, Mass., 1969
4. Haug, E. and Powell, G. H., "Analytical Shape Finding for Cable Nets," IASS Pacific Symposium-Part II on Tension Structures and Space Frames, Oct., Tokyo and Kyoto, 1971, pp.83-92
5. Knudson, W. C. and Scordelis, A. C., "Cable Forces for Desired Shapes in Cable Net Structures," IASS Pacific Symposium-Part II on Tension Structures and Space Frames, Oct., Tokyo and Kyoto, 1971, pp.93-102
6. Ohshima, H. and Kawamata, S., "A Problem of Surface Design for Prestressed Cable Nets," IASS Pacific Symposium-Part II on Tension Structures and Space Frames, Oct., Tokyo and Kyoto, 1971, pp.103-115
7. Argyris, J. H. and Scharpf, D. W., "Large

- Deflection Analysis of Prestressed Networks," Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, March, 1972
8. Holzer, S. M., "Static and Dynamic Stability of Reticulated Shells," Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, Proceedings of an International Colloquium, Washington, D.C., May 1977, ASCE Publications, pp.27-39
 9. Vilnay, O., "Structures Made of Infinite Regular Tensegric Nets," IASS Bulletin. No.63, Vol. XVIII-1, Apr., 1977, pp.51-57
 10. Motro, A., "Forms and Forces in Tensegrity Systems," Proc. of 3rd International Conference on Space Structures, 1984, pp.283-288
 11. Geiger, D. H., Roof Structure, U. S. Pat. 4, 736, 553, 1986
 12. Desai, Y. M., Popplewell, N., Shah, A. H. and Buragohain, D. N., "Geometric Nonlinear Static Analysis of Cable Supported Structures," Computers & Structures, Vol.29, No.6, 1988, pp.1001-1009
 13. Gasparini, D. A., Perdikaris, P. C. and Kanj, N., "Dynamic and Static Behavior of Cable Dome Model," Journal of Structural Engineering, Vol.115, No.2, Feb., 1989
 14. Meek, J. L., "Elasto-Plastic Analysis of Cable Net Structures," IASS-ASCE International Symposium, 1994
 15. 한상울, 윤종현, "케이블 돔의 안정화 이행 및 붕괴과정 해석, 대한건축학회논문집," 2001, 9, pp.41-48
 16. Kim,S.D., Kim,H.S., Sohn,S.D., Kang,M.M., Lee,S.G. and Kwun.T.J., "Dynamic Instability of Hybrid Cable Dome Structures," Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, edited by H. Kunieda, Nagoya, 2001.10., TP055, pp.1-8
 17. 김민정, 백인성, 김형석, 김승덕, "케이블 돔 구조물의 분기좌굴에 대한 브레이싱 보강 효과," 한국전산구조공학회 학술발표논문집, 제14권 2호, 2001, 10, pp.167-174
 18. 김민정, 김형석, 김승덕, "케이블 돔 구조물의 막재 보강에 의한 비선형 정적 불안정 거동의 효과," 대한건축학회 학술발표논문집, 2001, 10, pp.59-62
 19. 김승덕, 손수덕, 김형석, 강문명, "Hybrid 구조물의 비선형 불안정 거동에 관한 연구(1) : 초기형상 불완전에 의한 정적 면내비틀림 좌굴 특성," 韓國鋼構造學會 論文集, 第13卷, 第5號, 2001.10., pp.587-597
 20. 김승덕, 김형석, 강문명, "Hybrid 구조물의 비선형 불안정 거동에 관한 연구(2) : STEP 하중에서의 동적 면내비틀림 좌굴 특성," 韓國鋼構造學會 論文集, 第13卷, 第5號, 2001.10., pp.599-608
 21. Kim,H.S., Kim,S.D., Kang,M.M., Park,S.W. and Kwun,T.J., "Effects of the Bifurcation of Hybrid Cable Dome by Improving the Structural System," Lightweight Structures in Civil Engineering, edited by Jan B. Obrebski, Warsaw, 2002.6., pp.855-860
 22. 김형석, 김승덕, 강문명, "Zetlin형 케이블 돔 구조물의 정적 불안정 거동에 관한 연구," 한국전산구조공학회 학술발표논문집, 제15권 2호, 2002, 10, pp.541-548
 23. 백인성, 김형석, 김승덕, "케이블 돔 구조물의 축대칭 하중에 의한 비선형 불안정 현상에 관한 연구," 대한건축학회 학술발표논문집, 제23권 1호, 2003, 4, pp.27-30
 24. 김승덕, 백인성, 김형석, "축대칭 하중을 받는 Hybrid 케이블 돔의 Bifurcation 특성에 관한 연구," 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제16권, 제2집, 2003.10., pp.277-284
 25. 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
26. 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