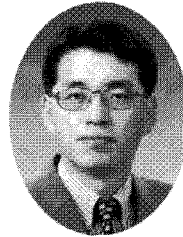
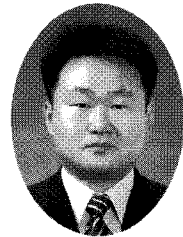


## 케이블 돔 구조시스템의 정적불안정 특성

- Static Unstable Characteristics of Cable Dome Structural System -



김 승 덕\*  
Kim, Seung-Deog

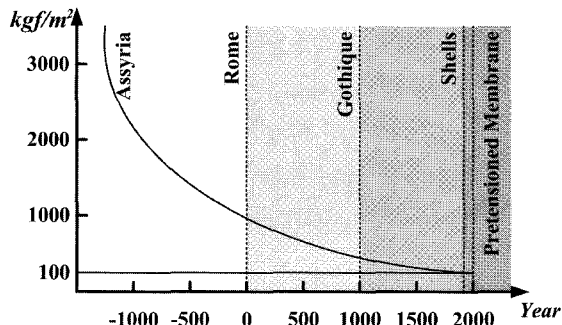


김 형 석\*\*  
Kim, Hyung-Seok

### 1. 서 론

대공간 구조물은 인류가 태동한 후, 보다 넓고 풍요로운 공간 속에서의 삶을 추구하면서 지속적으로 요구되어 왔다. 실외공간을 실내로 끌어 들여, 실내에서의 쾌적한 삶을 추구하고자 하는 인간의 지혜는 긴 역사에 걸쳐 구조시스템 및 재료의 개발을 통해 단위중량을 줄이고, 대공간을 확보하려는 노력을 경주해 왔으며 이러한 노력은 앞으로도 계속될 것이다.

대공간 구조물의 실현 가능성을 가늠하는 최대의 관건인 지붕구조의 변화는 재료와 기술의 변화와 함께 점차 경량화해 가고 있다. <그림 1>은 지붕의 중량을 시대 변화에 따라 나타낸 것이다. 가로축은 연



<그림 1> 지붕중량의 시대적 변화

대를, 세로축은 단위면적 당 지붕무게를 나타낸 것이다. 이 그림에서 세로축 100kgf/m<sup>2</sup>를 기점으로 수평선이 그어져 있다. 1962년, 대공간 구조 관련 국제학술회의에서 Rene Sarger는 이 그림을 보이며 “지붕중량이 100kgf/m<sup>2</sup> 이하가 되는 시대에 구조혁명(structural revolution)이 일어날 것이다”라는 흥미로운 발언을 하였다.

100kgf/m<sup>2</sup>는 바람에 의해 빨려 올라가는 힘(suction)의 차수를 나타내고, 중력의 지배로부터 해방되는 것을 의미한다. 이 그림에서 보면 지붕중량 곡선은 21세기초에 100kgf/m<sup>2</sup>의 수평선 아래로 들어가게 되고, 현재는 혁명 전야에 있다고 볼 수 있다.

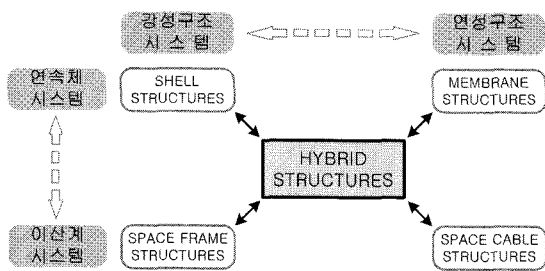
대공간 구조는 3차원적인 힘의 흐름과 면내력에 의해 외부하중에 대한 저항능력을 확보하는 형태저항형 구조로서, 기본적인 구조저항 메커니즘은 구조물 자체의 곡률을 이용하여 면외방향으로 작용하는 외력을 주로 면내력으로 저항할 수 있게 한 구조시스템이다.

따라서 최소의 재료로, 가볍고 얇게 대공간을 만들 수 있는 장점이 있다.

대공간 구조물은 이러한 셸 구조 원리를 이용하여 만들어지며, 구조시스템에 따라 세분하면 그림 2와 같이 연속체 셸 구조물(shell structures), 스페이스 프레임 구조물(space frame structures), 막 구조물(membrane structures), 케이블 구조물(space ca-

\* 세명대학교 건축공학과, 공학박사, 부교수

\*\* 경북대학교 건축공학과, 공학박사



〈그림 2〉 대공간 구조물의 분류

ble structures) 및 이들의 복합 구조체인 복합 구조물(hybrid structures)로 분류할 수 있다.

대공간 구조물은 각 시대의 사회적, 기술적 배경을 잘 나타내며 발전해 왔다. 발전된 순서는 a) 셸 구조, b) 스페이스 프레임 구조, c) 케이블 구조, d) 막 구조 등의 순이다. 재료의 강성으로부터 분류하면 a, b는 강성구조 시스템, c, d는 연성구조 시스템이다.

셸의 두께를  $t$ , 곡률반경을  $R$ , 변위를  $w$ 라 하면, 강성구조 시스템의 역학적 거동은  $w=t$ 의 차수인데 반해, 연성구조 시스템은  $w=R$ 의 차수까지 확대된다.  $w=t$ 와  $w=R$ 의 차이는 변형후의 구조형태를 예상할 수 있을지 없을지를 나타내는 지표가 된다. 그러므로 강성구조 시스템과 연성구조 시스템은 서로 다른 역학적 특성을 가진다.

이러한 다양한 구조시스템을 이용하여 대공간 구조물은 발전해 왔고, 현재의 기술수준은 스패 300m를 극복하고 있다. 또한 멀지 않은 장래에는 지구 생활권에서 우주 생활권으로 이어질 전망이다. 우주 환경이 지구의 환경과는 다르므로 우주에서의 구조물은 지구상의 구조물과는 다른 시스템으로 구축되어야 한다. 대형 전개식 구조물을 이용하여 보다 쾌적하고 경제적이며, 안정성이 우수한 우주공간의 개발은 우리의 당면과제가 되고 있다.

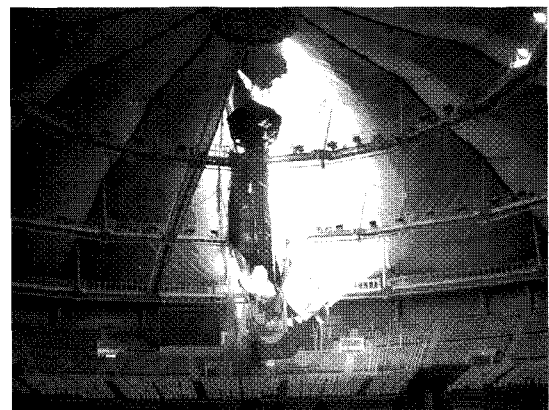
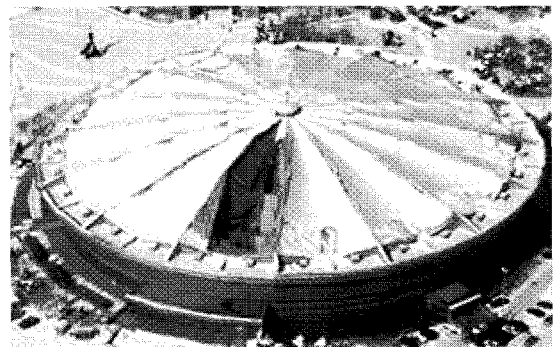
## 2. 대공간 구조물의 국내 사고사례

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 사용하

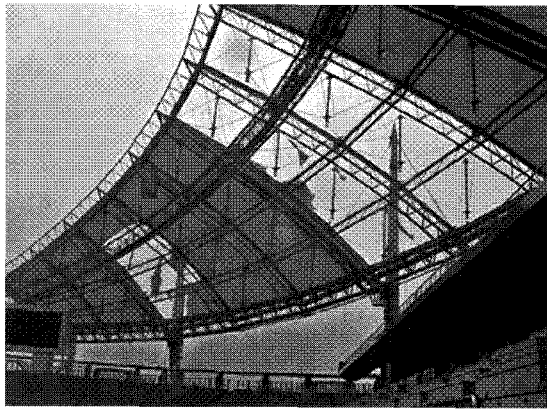
여 대공간 구조물을 보다 효과적으로 구축할 수 있는 구조시스템을 말한다.

국내에서는 1988년 서울올림픽을 위해 올림픽공원에 건설된 체조경기장과 펜싱경기장이 세계 최초의 케이블 돐 공법에 의한 막 구조의 도입이었다. 하지만, 체조경기장 지붕의 붕괴사고와 월드컵 경기장의 파손사례는 우리에게 이러한 대공간 구조물의 사고가 엄청난 인명과 재산피해를 가져올 수 있다는 경종을 울려주는 계기가 되었다. 이를 계기로 연성 구조 시스템에 대한 관심이 높아지게 되었으며, 특히 2002 월드컵을 위한 경기장의 건설로 인해 그 관심은 한층 증대되었으며 이에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

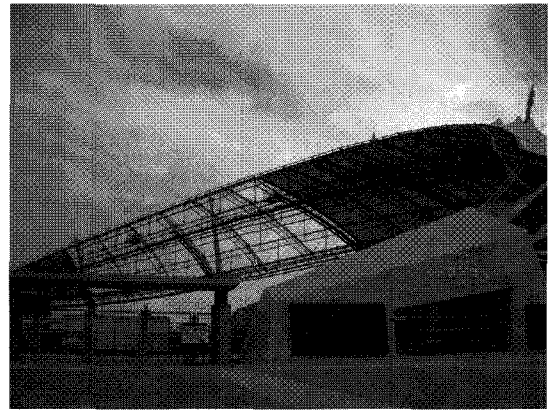
이러한 구조시스템들은 초기강성이 매우 약하며, 초기강성을 확보하기 위해서는 초기응력의 도입이 필수적이다. 즉, 연성구조 시스템인 막 구조물, 케이블 구조물 및 이들의 복합 구조체인 복합 구조물은 초기강성을 갖기 전에는 불안정 현상을 나타내지만 초기강성의 도입과 함께 안정상태가 된다. 그러나, 이러한 구조물은 하중 레벨이 어느 임계값에 도달하



〈그림 3〉 서울올림픽 체조경기장

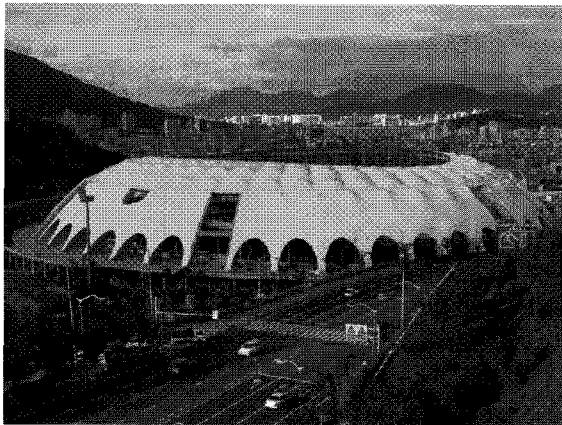


(a) 1차사고



(b) 2차사고

〈그림 4〉 서귀포경기장



〈그림 5〉 부산경기장

면 구조물의 형상에 따라 뿔좌굴(snap-through) 또는 분기좌굴(bifurcation)에 의한 불안정 현상이 일어나며, 이로 인한 파괴 메커니즘의 파악은 구조설계에서 매우 중요하다.

보다 안전하고 경제적인 구조물을 구축하기 위해서는 사고 및 붕괴의 원인이 정확히 규명되어야 한다. 즉, 설계과정에서 예상하지 못한 사고를 예방하기 위해서는 대공간 구조물의 붕괴 메커니즘에 대한 정확한 파악이 필요하며, 많은 연구자들에 의한 연구가 보고되고 있다.

### 3. 케이블 돔의 불안정 거동

케이블 돔 구조시스템은 인장케이블 및 압축기둥을 주재로로 사용한 연성구조시스템의 일종이다. 구

조재료의 역학적 거동특성은 휨모멘트 및 전단력을 받을 경우보다 축력을 부담할 경우가 유리하다. 또한 축력 중에서도 압축부재는 부재좌굴 등을 고려해야 하나, 인장부재는 재료의 파단강도까지 사용할 수 있어 역학적으로 가장 우수한 구조부재라 할 수 있다. 케이블 돔 구조물은 이러한 역학적 우수성을 고려하여 인장케이블 및 압축기둥만으로 연결된 텐세그러티 구조 시스템이다.

텐세그러티 구조물은 압축부재가 서로 직접 연결되지 않고 인장부재에 의해 연결되며, 전체적으로는 가볍고, 시공성이 우수한 특성을 지닌다. 그러나 케이블 돔 구조시스템은 외력의 증가에 따라 전체좌굴의 위험성을 가진다. 즉 대칭 구조물에 대칭형 외력이 작용할 경우에도 어떤 임계점 부근에서 비대칭의 변형모드가 출현하고, 이로 인해 구조물의 저항능력

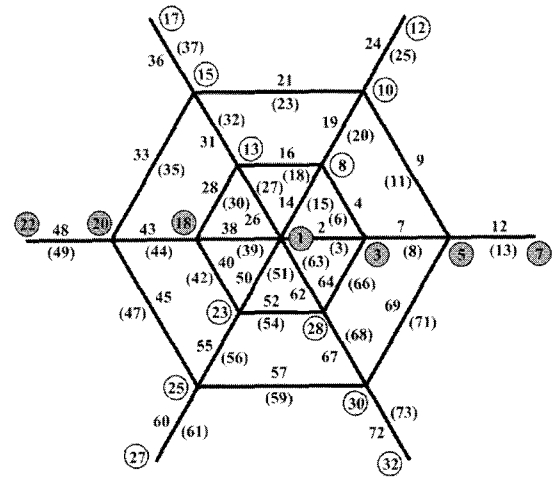
이 급격하게 저하된다. 이러한 현상을 분기좌굴이라 하며, 대공간 구조물의 구조설계시 반드시 반영하여야 한다.

본 고에서는 케이블 돔 구조시스템중 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔의 정적 불안정 특성을 알아본다. 즉 분기좌굴 현상의 초기형상불완전에 의한 민감도를 조사하여 각 시스템의 거동특성을 비교·분석하였다.

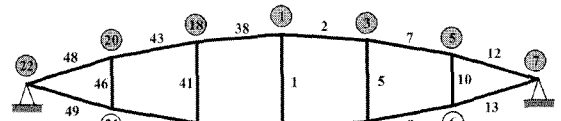
<그림 6, 7, 8>은 각각 Geiger형, Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔의 절점번호 및 요소번호를 나타내며, 각 절점의 좌표는 <표 1>과 같다.

<표 1> 절점 좌표 (단위 : cm)

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

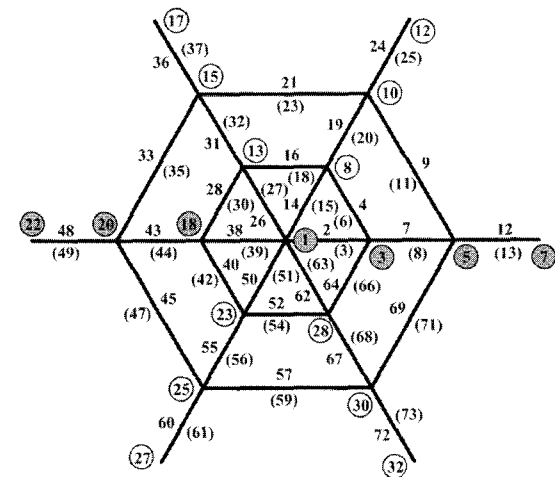


(a) 평면도

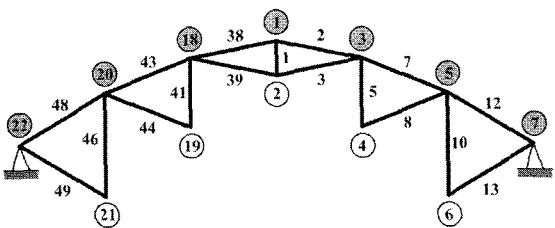


(b) 단면도

<그림 7> Zetlin형 케이블 돔

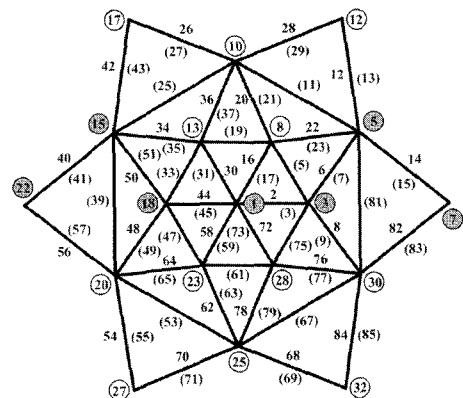


(a) 평면도

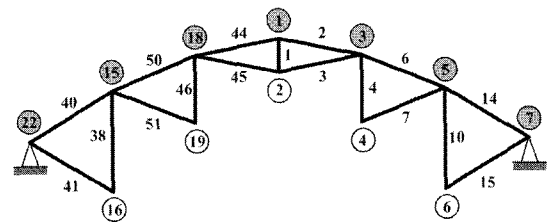


(b) 단면도

<그림 6> Geiger형 케이블 돔



(a) 평면도



(b) 단면도

<그림 8> Flower형 케이블 돔

해석에 사용된 각 부재의 물성치는 케이블과 mast 모두 영계수  $E=1.6 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ , 밀도  $\rho=7.85 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$ 이고, 단면적은 <표 2>와

<표 2> 부재의 단면적 (단위 : cm<sup>2</sup>)

단 면 적	0.01	0.02	0.04	1.0	
부재번호	Geiger	2/3/4/9	6/7/8	11/12/13	1/5/10
	Zetlin	2/3/4/9	6/7/8	11/12/13	1/5/10
	Flower	2/3	5/6/7/8/9	11/12/13/14/15	1/4/10

같다.

하중조건은 각 모델의 상부절점 전체에 단위하중이 -Z 방향으로 작용하는 하중모드를 이용하며, 본 고에서는 전체 축대칭 하중모드에 한정하여 불안정 특성을 알아본다.

케이블 돔의 구조거동 특성은 초기장력 및 외력에 따라 비선형성이 강하게 나타나므로 초기장력 도입에 의해 형상을 결정한 후, 외력에 의한 불안정 현상을 파악하였다. 초기장력은 Geiger형 케이블 돔의 초기장력을 기준으로 Zetlin형 및 Flower형 케이블 돔의 초기장력을 산정하였다.

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

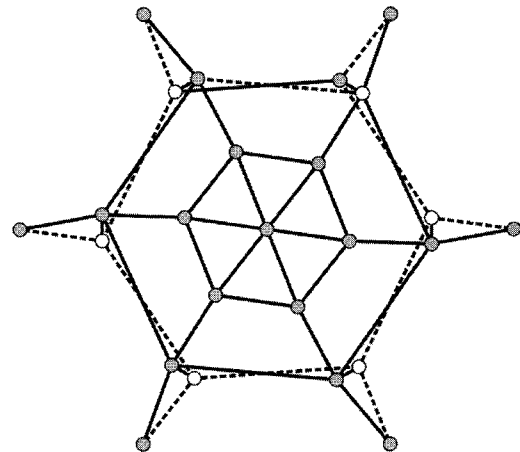
정적 불안정해석에서 분기좌굴 현상을 파악하기 위해서는 초기형상불완전을 도입해야 한다. 초기형상불완전 모드는 점선강성행렬의 초기증분에 대한 고유치 해석에서 얻은 1차 고유벡터를 선택하여 이를 초기형상불완전 모드로 하였다. 각각의 해석모델에 대한 초기형상불완전 모드를 나타내면 <그림 9>와 같다. 여기서 실선은 상부부재 및 mast를, 점선은 하부부재를 각각 나타낸다.

초기형상불완전의 크기는 해석모델의 span을 기준으로 하여, span의 0.01% 및 0.1%를 초기형상불완전량으로 도입하였으며, 이들 해석결과를 완전형상 모델의 결과와 비교하였다.

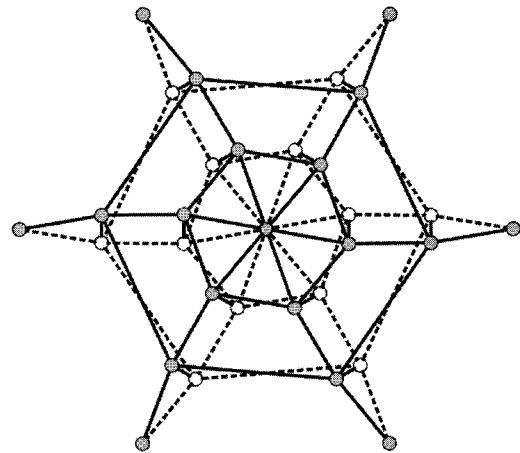
정적 임계하중을 구하기 위해 점선강성행렬의 행렬식(determinant)을 각 증분구간에서 구하였다. 해석 모델별로 완전형상인 경우와 0.01%, 0.1%의 초기형상불완전을 도입하였을 경우로 나누어 행렬식을 구하면 <그림 10>과 같다.

Geiger형 케이블 돔의 경우 행렬식 값이 특이점

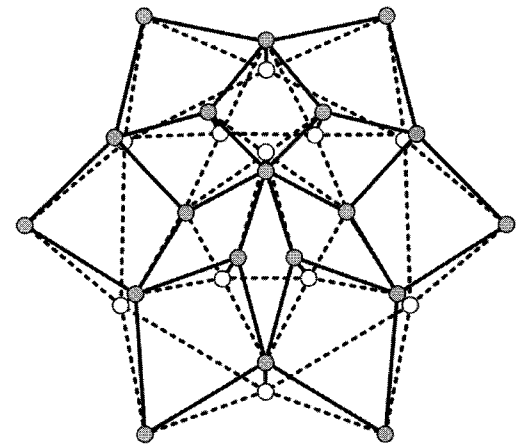
을 나타내는 절점하중 레벨은 절점당 11.84 kgf(총하중 153.92 kgf)이고, Zetlin형 케이블 돔의 경우행렬식 값이 특이점을 나타내는 절점하중 레벨은 절점당 9.77 kgf(총하중 127.01 kgf)이다.



(a) Geiger형 케이블 돔

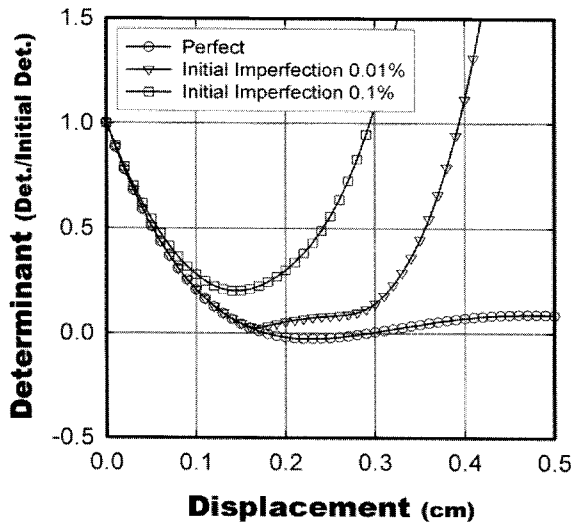


(b) Zetlin형 케이블 돔

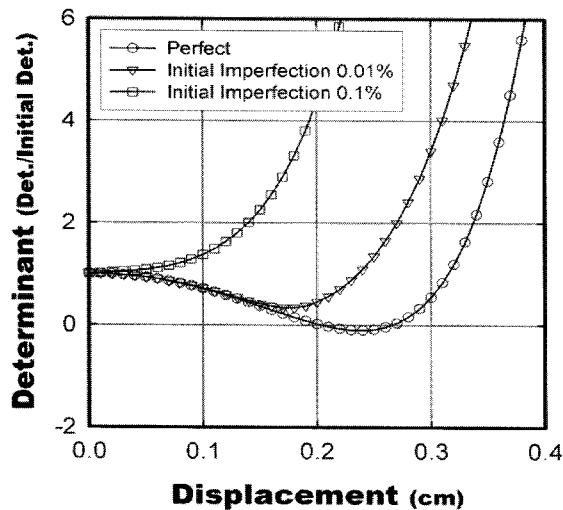


(c) Flower형 케이블 돔

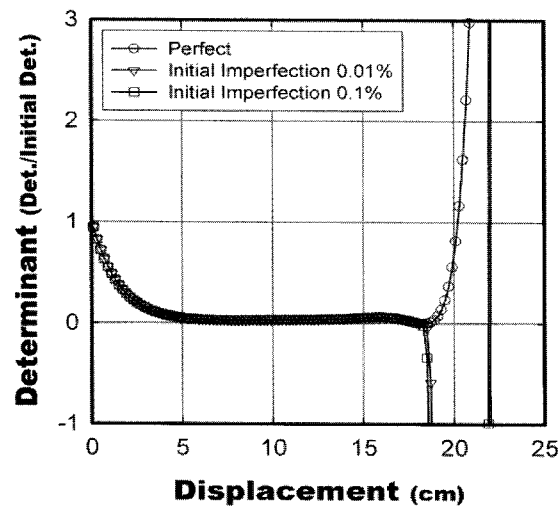
<그림 9> 초기형상불완전 모드



(a) Geiger형 케이블 돔



(b) Zetlin형 케이블 돔



(c) Flower형 케이블 돔

<그림 10> 접선강성의 행렬식

Geiger형 케이블 돔과 Zetlin형 케이블 돔의 경우, 초기형상불완전을 도입한 경우는 행렬식 값이 0을 향해 접근하다 0 부근에서 되돌아가는 것을 알 수 있고, 초기형상 불완전이 클수록 이러한 현상은 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 완전형상 모델에서는 평형계도에서 불안정 점이 나타나더라도 피할 수 없으므로 0점을 통과하게 되고, 초기형상불완전을 도입하면 불안정 점 부근에서 새로운 직교좌굴모드의 출현과 함께 변형모드가 변하게 되므로 강성이 안정화해 갈 수 있기 때문이다.

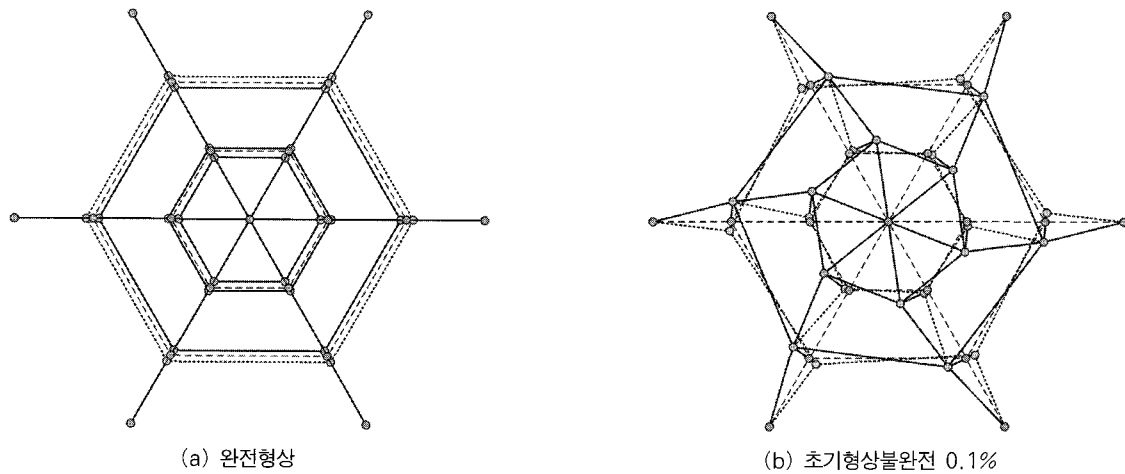
Flower형 케이블 돔의 경우 행렬식 값이 특이점을 나타내는 절점하중 레벨은 절점당 326.8 kgf(총하중 4248.4 kgf)이다. 특이점은 절점하중 326.8 kgf(절점변위 18.3 cm)이지만, 그 전단계인 절점하중 287 kgf(절점변위 7.94 cm)에서부터 0에 접근하고 있다. 이때의 행렬식은 초기값의 약 2.8%에 해당하는 값으로 구조물의 불안정을 야기시키기에 충분하다. 여기서 절점하중 287 kgf일 때 1차 불안정점이라 하고 절점하중 327 kgf를 2차 불안정점이라 할 수 있다.

초기형상불완전량에 의한 접선강성은 Geiger형과 Zetlin형에서는 점차 회복해가는 반면에 Flower형에서는 1, 2차 불안정점에서 각기 다른 변화를 보인다. 1차 불안정점에서는 회복하는 경향이 나타나지만 2차 불안정점에서는 (-)값으로 변화해 가고 있다. 이러한 모든 현상을 종합해 볼 때 Flower형 케이블 돔의 불안정 특성은 1, 2차에 걸쳐서 나타나고 1차 불안정점에서는 분기좌굴 현상이 나타나고 2차 불안정점에서는 뒤틀좌굴현상이 나타남을 알 수 있다. 이때의 뒤틀좌굴은 국부적으로 일어나며 이로 인해 구조물 전체의 쓸림현상을 야기시킨다.

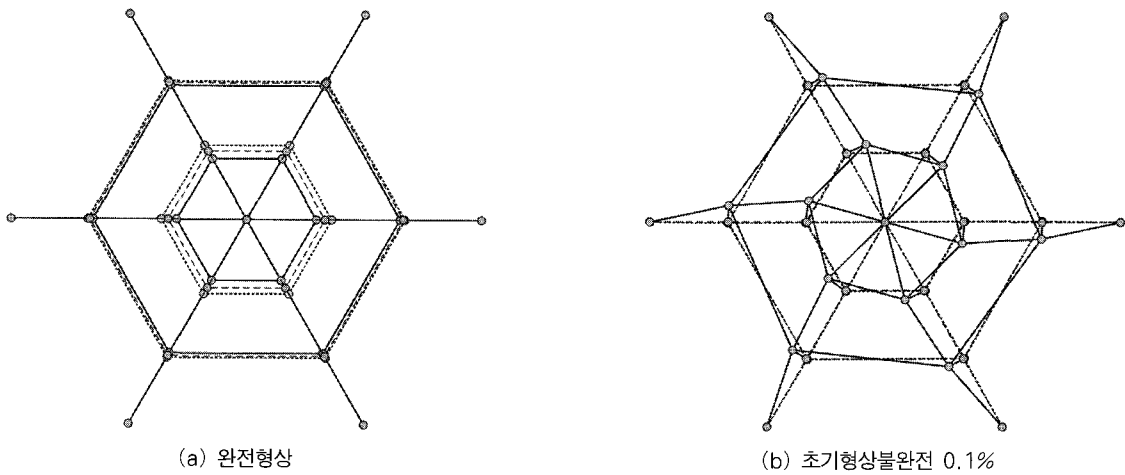
각각의 해석모델에 대한 정적 분기좌굴 하중을 정리하면 <표 3>과 같다.

<표 3> 정적 분기좌굴 하중 (단위 : kgf)

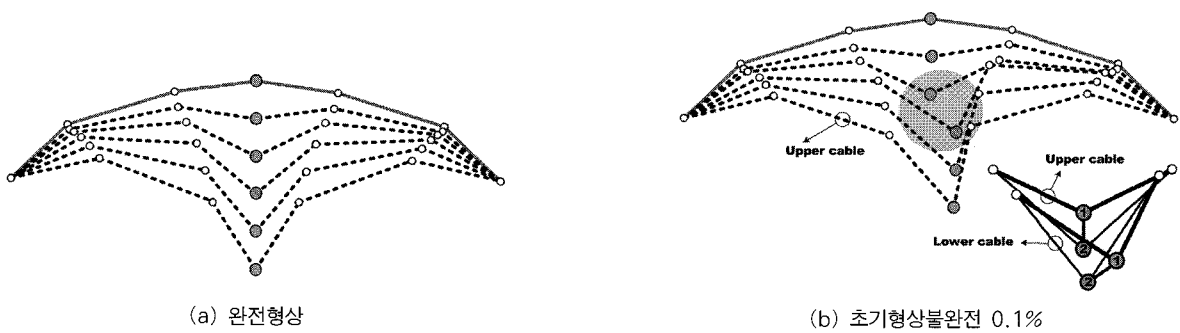
해석모델	절점당	Total	Ratio
Geiger	11.84	153.92	1.21
Zetlin	9.77	127.01	1.0
Flower	1차	287	4872.69
	2차	326.8	5556.83



〈그림 11〉 불안정 거동특성(Geiger형)



〈그림 12〉 불안정 거동특성(Zetlin형)



〈그림 13〉 불안정 거동특성(Flower형)

〈그림 11, 12, 13〉은 각각의 해석모델에 대해 변위증가에 따른 불안정 거동특성을 완전형상인 경우와 초기형상불완전을 도입한 경우로 나누어 시각화하여 나타낸 것이다.

Geiger형과 Zetlin형 케이블 돔의 경우 완전형상 모델에서는 면내비틀림에 의한 불안정 현상이 발생

하지 않으나 초기형상불완전을 도입하면 불안정점 부근에서 면내비틀림에 의한 불안정 현상이 발생하게 된다. 하지만, Flower형 케이블 돔의 경우 초기형상불완전을 도입하면 불안정 변형모드와의 연성작용에 의해 쏠림현상이 발생하게 된다.

## 4. 결 론

본 고에서는 전체 축대칭 하중을 받는 Geiger형, Zetlin형, Flower형 케이블 돔 구조물의 정적 불안정 특성을 알아보았다. 특히 쉘형 구조물의 구조불안정 거동이 초기조건에 매우 민감하게 반응하므로 초기형상불완전에 의한 영향도 알아보았다.

Geiger형과 Zetlin형 케이블 돔 구조물의 불안정 현상은 평형궤도의 분기좌굴 현상에 의해 발생한다. 그러나, Flower형 케이블 돔 구조물은 1, 2차의 불안정 현상으로 나누어 나타난다. 1차 불안정에서는 분기좌굴 현상이, 2차 불안정점에서는 뿔좌굴 현상이 일어난다. 이때 뿔좌굴은 국부적으로 일어나며 이로 인해 구조물 전체에 쏠림현상을 야기시킨다. 즉, 케이블 돔 구조물은 케이블의 조립형태에 따라 불안정 거동특성이 달라짐을 알 수 있고 본 고에서 채택한 구조시스템을 비교·분석한 결과, Flower형 구조시스템이 가장 안정적임을 알 수 있다.

또한, 케이블 돔 구조물의 구조거동 특성은 하중 조건 및 초기형상불완전에 대해 매우 민감하게 반응하므로 이러한 불안정 거동특성을 분석하여 구조설계시 반드시 반영하여야 한다.

## 참 고 문 헌

1. Seung-Deog Kim, Hyung-Seok Kim and Moon-Myung Kang, "A Study of the Nonlinear Dynamic Instability of the Hybrid Cable Dome Structures," Structural Engineering and Mechanics, Vol.15, No.6, 2003, pp.653-668.
2. Seung-Deog Kim, Hyung-Seok Kim, Su-Deok Sohn and Moon-Myung Kang, "A Study on Dynamic Transient Analysis of Plates with Initial Stress," Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, Seoul, Korea, Volume II, 16-18, October, 2000, pp.625-632.
3. Seung-Deog Kim, Hyung-Seok Kim, Su-Deok Sohn, Moon-Myung Kang, Soo-Gon Lee and Taek-Jin Kwun, "Dynamic Instability of Hybrid Cable Dome Structures," International Symposium on Theory, Design and Realization of Shell

- and Spatial Structures, Nagoya, Japan, 9-13, October, 2001.
4. Hyung-Seok Kim, Seung-Deog Kim, Moon-Myung Kang, Sun-Woo Park and Taek-Jin Kwun, "Effects of the Bifurcation of Hybrid Cable Dome by Improving the Structural System," Proceedings of the International IASS Symposium on Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw, Poland, 24-28, June, 2002, pp.855-860.
5. 김승덕, 손수덕, 김형석, 강문명, "Hybrid 구조물의 비선형 불안정 거동에 관한 연구(I) : 초기형상 불완전에 의한 정적 면내비틀림 좌굴 특성," 한국강구조학회논문집, 제13권, 제5호, 통권54호, 2001. 10., pp.587-598.
6. 김승덕, 김형석, 강문명, "Hybrid 구조물의 비선형 불안정 거동에 관한 연구(II) : STEP 하중에서의 동적 면내비틀림 좌굴 특성," 한국강구조학회논문집, 제13권, 제5호, 통권54호, 2001. 10., pp.599-608.
7. 김승덕, 김형석, 백인성, "케이블 돔 구조물의 불안정 현상에 대한 브레이싱 보강 효과," 한국공간구조학회논문집, 제1권, 제2호, 2001. 12., pp.75-83.
8. 김승덕, 김형석, 김민정, "Hybrid 케이블 돔 구조물의 비선형 동적 불안정 거동에 관한 연구," 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권, 제1호, 2001. 4. 28, pp.195-198.
9. 김민정, 김형석, 김승덕, "케이블 돔 구조물의 막재 보강에 의한 비선형 정적 불안정 거동의 효과," 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권, 제2호, 2001. 10. 27, pp.59-62.
10. 김민정, 백인성, 김형석, 김승덕, "케이블 돔 구조물의 분기좌굴에 대한 브레이싱 보강 효과," 한국전산구조공학회 가을학술발표논문집, 2001, pp.167-174.
11. 김형석, 김승덕, 강문명, "Zetlin형 케이블 돔 구조물의 정적 불안정 거동에 관한 연구," 한국전산구조공학회 가을학술발표논문집, 2002, pp.541-548.



12. 백인성, 김형석, 김승덕, “케이블 돔 구조물의 하중모드에 따른 불안정 현상에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표논문집, 제22권, 제2호, 2002. 10. 26, pp.87-90.

13. 백인성, 김형석, 김승덕, “케이블 돔 구조물의 축대칭 하중에 의한 비선형 불안정 현상에 관한 연구,” 대한건축학회 학술발표논문집, 제23권, 제1호, 2003. 4. 26, pp.27-30.