

## 서울 서남권 돐 야구장의 Snapping 검토에 관한 연구

### A study of the Snapping investigations of Seoul Southwest Baseball Dome

김 승 덕\*  
Kim, Seung-Deog

김 남 석\*\*  
Kim, Nam-Seok

#### 요 약

본 논문은 서울 서남권 돐 야구장의 불안정 거동을 파악하고자 한다. 해석 대상 구조물의 설계하중과 이들의 조합 하중에 의한 하중모드에 대하여 구조물의 비선형 Snapping 현상을 조사하며, 초기 불완전성은 접선강성행렬의 고유치해석을 통해 좌굴 모드를 얻고 이를 비선형해석에 이용한다. 단 부재좌굴 또는 국부좌굴 등은 본 연구과제의 연구범위에 고려치 않으며, 전체좌굴 현상에 한정한다.

#### Abstract

This paper studies on the instability behaviour of the Seoul southwest baseball dome. The nonlinear Snapping phenomenon of the structure is investigated about the load mode by the design load of analysis structure and these combined loads. The initial imperfection obtains the buckling mode through the eigenvalue analysis of the tangential stiffness matrix and uses this for the nonlinear analysis. However, the buckling of members or the local buckling, and etc don't consider in the research range of this research task. Also it is limited the overall buckling phenomenon.

키워드 : 안정성, 분기, 좌굴, 하중모드, 초기불안정, 기하학적 비선형

Keywords : stability, Bifurcation, Buckling, Load mode, Initial imperfection, Geometric Nonlinear

#### 1. 서 론<sup>1)</sup>

21세기로의 도약을 향해 우리들은 첨단산업을 중심으로 하는 기술집약 시대를 맞고 있으며, 여러 첨단산업들 중에서도 초대형 구조물 분야, 특히 대공간 구조물 분야의 기술력 확보는 최근 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 대공간 구조물은 구조거동 특성상 주로 구조안정(structural stability) 문제가 설계의 중요한 기술력의 핵심이 되며, 이를 어떻게 해결할 것인가 하는 문제는 아직도 많은 연구자들 사이에서 난제로 남아 있다.

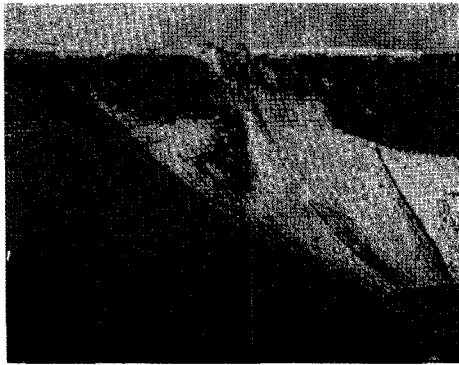
초대형 구조물 분야, 특히 대공간 구조물 분야의 고급 기술력은 21세기의 도약을 향한 우리나라의

중요한 첨단산업 중 하나이다. 그러나 아직도 우리가 정확히 알 수 없는 다양한 파괴 메커니즘에 의해 많은 사고가 발생하고 있다. 사고 사례는 시공 과정에서도 일어나고 시공 후에도 일어나는 등 다양한 형태로 일어나고 있으며, 대공간 구조물에서의 사고 피해 규모는 다른 일반적인 구조물에 비해 상대적으로 매우 크다. 그 한 예로 1963년의 철골조 대공간 구조물의 사고를 소개한다. 1961년에 래티스 시스템으로 만들어진 루마니아의 Bucharest 돐이 설계하중의 30% 정도의 외력에 돐 전체가 붕괴되는 사고가 발생하였다.(그림 1.1)이 사고 후 많은 구조설계자들은 쉘형 골조구조물의 구조안정(Structural Stability) 문제의 중요성을 알게 되었고, 많은 연구자들이 이를 규명하기 위해 연구를 계속해 왔다.

\* 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사(교신저자)  
Tel: 043-649-1326

E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

\*\* 세명대학교 건축공학과 공학석사

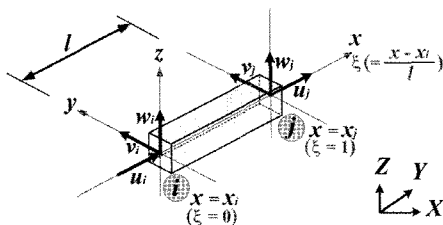


〈그림 1.1〉 Bucharest Dome 붕괴 사고

본 연구는 서울 고척동 돔을 대상으로, 보다 경제적이고 안전한 건물을 만들 수 있게 상부 지붕 구조물의 구조안정성을 평가하여 설계에 반영하고자 한다. 이를 위해서는 기하학적 비선형해석이 필요하고, 국내에서 유일하게 Snapping 해석용으로 개발된 NASS 프로그램을 사용하여 불안정 거동을 평가한다. 초기조건에 매우 민감한 거동이 예상되므로 하중조건, 좌굴모드, 초기불완전량 등을 변수로 하여 불안정 거동을 조사하고, 안전 여부를 평가한다. 단 부재좌굴 또는 국부좌굴 등은 본 연구과제의 연구범위에 고려치 않으며, 전체좌굴 현상에 한정한다.

## 2. 접선 강성방정식에 의한 정식화

국부좌굴계에서 트러스 요소의 요소 좌표계를 〈그림 2.1〉에서와 같이 정의한다.



〈그림 2.1〉 접선 강성방정식 요소의 절점자유도와 좌표계

한 요소가 갖는 절점을 2개로 두고 요소내 변위를 식(1)과 같이 Lagrangian 보간 함수  $N_i$ 와  $N_j$ 를 이용하여  $x$ 에 관한 1차식으로 가정한다.

$$u(x) = N_i u_i + N_j u_j$$

$$v(x) = N_i v_i + N_j v_j \quad (1)$$

$$w(x) = N_i w_i + N_j w_j$$

요소의 변형도-변위 관계식을 기하학적 비선형을 나타내는 2차항까지를 다음과 같이 채택한다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

중분구간에서 응력도-변형도 관계식을 식(3)과 같이 채택한다.

$$\sigma_x = E \epsilon_x \quad (3)$$

가상일의 원리를 이용하여 그림 2.1과 같은 비선형 트러스 요소의 평형 방정식을 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_V \sigma_x \delta \epsilon_x dV = f^T \delta d \quad (4)$$

현재의 상태를 초기상태로 가정하고, 현 상태에서의 증분에 관한 가상일의 원리를 적용하면 식(5)와 같다.

$$\int_V [(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x) \delta \epsilon_x] dV = (f^{(0)} + f)^T \delta d \quad (5)$$

적분영역  $dV$ 를 일정단면적  $A$ 와 일정길이  $l$ 로 치환하고,  $\delta d$ 는 임의의 가상변위이므로 다음식과 같아야 한다.

$$Al [(\sigma_x^{(0)} + \sigma_x) (A_1 + d^T B^T B)] = (f^{(0)} + f)^T \quad (6)$$

여기서,

$A$  : 요소의 단면적  $l$  : 요소의 길이

식(3)을 식(6)에 대입하고,  $d$ 에 관한 2차항 이상을 소거하여 양변행렬에 전치를 취하면 다음과 같이 된다.

$$f^{(0)} + f = Al(A_1^T \sigma_x^{(0)}) + Al(\sigma_x^{(0)} B^T B) d \quad (7)$$

$$+ AlE(A_1^T A_1) d + \text{고차항}$$

식(7)에서  $d$ 에 관한 고차항의 소거로 인하여 생기는 불평형력(residual force)은 식(8)와 같이 정의한다.

$$r = Al A_1^T \sigma_x^{(0)} - f^{(0)} \quad (8)$$

식(8)를 식(7)에 대입하면, 식(9)와 같은 접선 강성 방정식을 구할 수 있다.

$$f - r = AlE(A_1^T A_1) d + Al(\sigma_x^{(0)} B^T B) d \quad (9)$$

$$= (k_E + k_G) d$$

증분형 강성방정식을 절점하중벡터, 불평형력벡터, 절점 변위벡터를 변환행렬을 이용하여 전체 좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

$$F - R = (K_E + K_G) D \quad (10)$$

이상의 증분형 강성방정식을 수치해석기법을 이용하여 공간구조물의 불안정 거동을 살펴보기로 한다.

### 3. 불안정거동 특성

강성구조 시스템의 특징은 외력 레벨이 증가함에 따라 안정에서 불안정 영역으로의 이행한다. 이때 구조거동의 특성으로는 Snap-through 현상과 Bifurcation 현상이 대표적으로 나타난다. 이들 불안정 거동을 파악하기 위해 접선강성 방정식을 이용해 step by step 으로 해석을 수행하여야 하며, 각 증분구간에서 강성을 체크하여 불안정 특성을 판정하여야 한다.

불안정 특성을 판정하기 위해 비선형 평형궤도의 각 증분구간에서 접선강성 방정식을 이용하여 임계하중에 도달하였을 때의 좌굴점을 분류해 본다. 제1 섭동방정식을 다음과 같이 나타낸다.

$$K \dot{d} + f \lambda = 0 \quad (11)$$

여기서, 접선강성행렬  $K$ 는 보존계(conservative system)에서는 대칭행렬이고, 서로 직교하는 직교 변환행렬(orthogonal transformation matrix)이 존재하므로, 따라서 대각화가능(diagonalizable)행렬이 된다.  $K$ 의  $n$ 개의 고유치를  $c_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 이에 대응하는 정규화 고유벡터를  $t_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )라 하고,  $t_i$ 를 열벡터로 하는 변환행렬  $T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_n] \quad (12)$$

여기서  $T$ 는 직교행렬(orthogonal matrix)이므로  $T^T = T^{-1}$ 가 성립한다. 변환행렬  $T$ 를 이용하여 변위벡터  $\dot{d}$ 를 다음과 같이  $\dot{u}$ 로 나타낸다.

$$\dot{d} = \begin{pmatrix} \dot{d}_1 \\ \Delta \dot{d} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ \Delta \dot{u} \end{pmatrix} = T \dot{u} \quad (13)$$

여기서  $\Delta \dot{d}$ 와  $\Delta \dot{u}$ 는 각각  $\dot{d}$ 와  $\dot{u}$ 에서  $\dot{d}_1$ ,  $\dot{u}_1$ 를 제외한  $(n-1)$ 차의 열벡터이다. 식(13)을 식(11)에 대입하고 양변에  $T^T$ 를 곱하면,

$$T^T K T \dot{u} + T^T f \lambda = 0 \quad (14)$$

위 식에서 다음의 계수행렬을 정의한다.

$$g = T^T f = \begin{pmatrix} t_1 \cdot f \\ t_2 \cdot f \\ \vdots \\ t_n \cdot f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ \Delta g \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$C = T^T K T = \begin{pmatrix} c_1 & & & zero \\ & c_2 & & \\ & & \ddots & \\ zero & & & c_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & \Delta C \end{pmatrix} \quad (16)$$

# 서울 서남권 돔 야구장의 Snapping 검토에 관한 연구

## A study of the Snapping investigations of Seoul Southwest Baseball Dome

김 승 덕\*  
Kim, Seung-Deog

김 남 석\*\*  
Kim, Nam-Seok

### 요 약

본 논문은 서울 서남권 돔 야구장의 불안정 거동을 파악하고자 한다. 해석 대상 구조물의 설계하중과 이들의 조합 하중에 의한 하중모드에 대하여 구조물의 비선형 Snapping 현상을 조사하며, 초기 불안정성은 접선강성행렬의 고유치해석을 통해 좌굴 모드를 얻고 이를 비선형해석에 이용한다. 단 부재좌굴 또는 국부좌굴 등은 본 연구과제의 연구범위에 고려치 않으며, 전체좌굴 현상에 한정한다.

### Abstract

This paper studies on the instability behaviour of the Seoul southwest baseball dome. The nonlinear Snapping phenomenon of the structure is investigated about the load mode by the design load of analysis structure and these combined loads. The initial imperfection obtains the buckling mode through the eigenvalue analysis of the tangential stiffness matrix and uses this for the nonlinear analysis. However, the buckling of members or the local buckling, and etc don't consider in the research range of this research task. Also it is limited the overall buckling phenomenon.

키워드 : 안정성, 분기, 좌굴, 하중모드, 초기불안정, 기하학적 비선형

Keywords : stability, Bifurcation, Buckling, Load mode, Initial imperfection, Geometric Nonlinear

## 1. 서 론<sup>1)</sup>

21세기로의 도약을 향해 우리들은 첨단산업을 중심으로 하는 기술집약 시대를 맞고 있으며, 여러 첨단산업들 중에서도 초대형 구조물 분야, 특히 대공간 구조물 분야의 기술력 확보는 최근 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 대공간 구조물은 구조거동 특성상 주로 구조안정(structural stability) 문제가 설계의 중요한 기술력의 핵심이 되며, 이를 어떻게 해결할 것인가 하는 문제는 아직도 많은 연구자들 사이에서 난제로 남아 있다.

초대형 구조물 분야, 특히 대공간 구조물 분야의 고급 기술력은 21세기의 도약을 향한 우리나라의

중요한 첨단산업 중 하나이다. 그러나 아직도 우리가 정확히 알 수 없는 다양한 파괴 메커니즘에 의해 많은 사고가 발생하고 있다. 사고 사례는 시공 과정에서 일어나고 시공 후에도 일어나는 등 다양한 형태로 일어나고 있으며, 대공간 구조물에서의 사고 피해 규모는 다른 일반적인 구조물에 비해 상대적으로 매우 크다. 그 한 예로 1963년의 철골조 대공간 구조물의 사고를 소개한다. 1961년에 래티스 시스템으로 만들어진 루마니아의 Bucharest 돔이 설계하중의 30% 정도의 외력에 돔 전체가 붕괴되는 사고가 발생하였다.(그림 1.1)이 사고 후 많은 구조설계자들은 쉘형 골조구조물의 구조안정(Structural Stability) 문제의 중요성을 알게 되었고, 많은 연구자들이 이를 규명하기 위해 연구를 계속해 왔다.

\* 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사(교신저자)

Tel: 043-649-1326

E-mail : sabinus@semyung.ac.kr

\*\* 세명대학교 건축공학과 공학석사

여기서  $C$ 는 고유치로 구성된 대각화 행렬이고,  $t_i \cdot f$ 는 두 벡터의 내적을 의미한다. 위의 식을 식(14)에 대입하면,

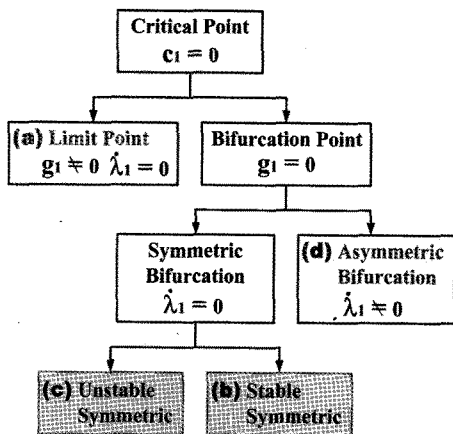
$$\begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & \Delta C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ \Delta \dot{u} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g_1 \\ \Delta g \end{pmatrix} \lambda = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (17)$$

식(16)에서 최소 고유치를  $c_1$ 이라 하면 ( $c_1 < c_2 \leq \dots \leq c_n$ ), 특이점(singular point)에서는  $\det(K) = 0$ 이므로  $\det(C) = 0$ 이 성립하고, 따라서  $c_1 = 0$ 이 된다. 그러므로 식(17)의 첫 행 연산에 의해 다음의 관계가 성립한다.

$$g_1 \lambda = 0 \quad (18)$$

위 식의  $\lambda$  및  $g_1$ 을 이용하면 좌굴점은 그림 3.1에서와 같이 분류할 수 있다.  $g_1$ 의 의미를 생각해 보면,  $g_1 = t_1 \cdot f$ 이므로,  $c_1$ 에 대응하는 고유행렬  $t_1$ 과 하중모드  $f$ 가 직교함을 의미한다.

$g_1 = 0$ 인 경우가 분기점이 되며 분기좌굴(bifurcation)을 발생시킨다. 이때  $\lambda = 0$ 일 때가 대칭분기점,  $\lambda \neq 0$ 일 때가 비대칭 분기점이 된다. 또  $g_1 \neq 0$ 인 경우에는  $\lambda = 0$ 일 때가 극한점이 되며 뿔좌굴(snap-through)을 발생시킨다.



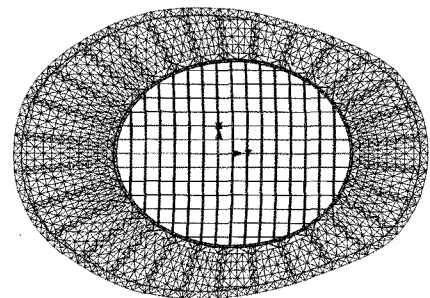
〈그림 3.1〉 좌굴점의 분류

## 4. 서울 서남권 돔 야구장 해석

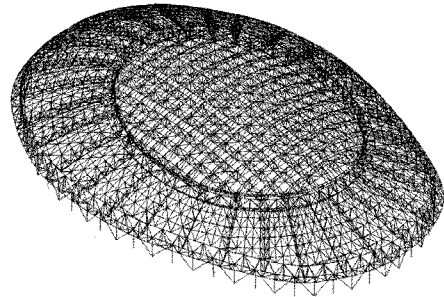
서울 서남권 돔 야구장의 불안정 거동을 파악하고자 한다. 해석 대상 구조물의 설계하중과 이들의 조합 하중에 의한 하중모드에 대하여 구조물의 비선형 Snapping 현상을 조사하며, 초기 불완전성은 접선강성행렬의 고유치해석을 통해 좌굴 모드를 얻고 이를 비선형해석에 이용한다. 이들 결과로부터 구조물의 좌굴 하중과 불안정 현상을 비교·고찰한다.

### 4.1 구조물의 개요 및 하중 모드

본 프로젝트의 야구장 지붕의 평면도와 입체도는 〈그림 4.1〉에서 보는 바와 같다. 밀변의 최장 저면 직경의 길이는 약 214m이며, 짧은 방향으로는 약 157m이다.



(a) 평면도



(b) 입체도

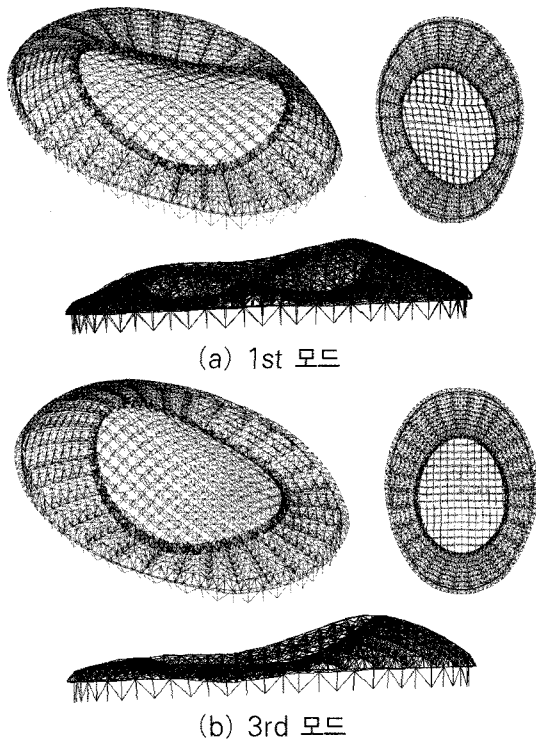
〈그림 4.1〉 서울 서남권 돔 야구장의 형상

일반적으로 구조물의 지붕에서 고려하는 설계하중은 고정하중(DL), 적재하중(LL), 적설하중(SL) 및 풍하중(WL)인데 풍하중에 대해서는 하중값이 실험을 통하여 얻어지므로 하중모드에 특정한 방향성을 갖지 않는다. 따라서 본 연구에서는 고정하중(DL),

적재하중(LL), 적설하중(SL)의 조합으로 구성한다. 이때 적설하중은 구조물이 등분포로 재하될 경우의 하중조합, x 방향에 대해서 편심이 작용하는 하중조합 그리고 y 방향에 대해서 편심이 작용하는 하중조합으로 한다.

4.2 구조물의 좌굴 모드

본 절에서는 해석 모델의 초기 불완전성을 고려하기 위하여 고유치 해석을 수행한 결과 고유치 값이 가장 낮은 모드인 1st 역대칭 모드와 2nd의 대칭 모드 그리고 3rd 모드로 나타난다. 본 해석에서는 <그림 4.2>와 구조물이 가장 좌굴하기 쉬운 불안정한 상태의 1st 모드와 3rd 모드의 비대칭 모드 두가지를 해석시 고려하도록 한다.



<그림 4.2> 해석대상 구조물의 좌굴모드

4.3 해석 모델의 분류

구조물의 하중 모드와 좌굴 모드의 구성에 따라서 해석모델을 모두 열 다섯가지 경우로 구성하였다. 선택한 모델은 초기 불완전성을 고려하지 않은

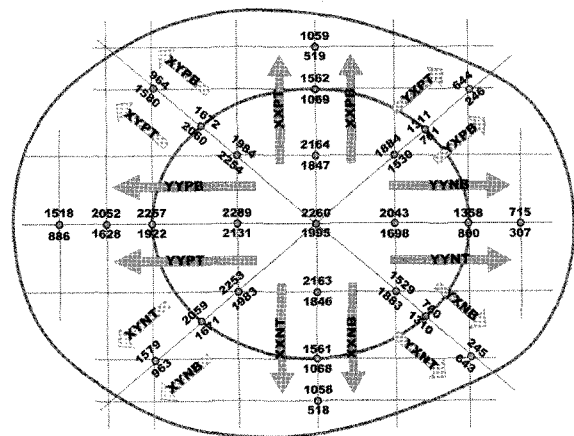
모델들에 각각의 하중 모드에 대한 해석 모델과 각각의 좌굴 모드에 대한 불완전량을 0.1% 및 0.2%를 고려한 모델로 구성하였다. 여기서 불완전량은 구조물의 최대 저면직경에 대한 량으로 이 구조물에서는 각각 21cm 와 42cm 의 크기를 각각의 모드의 벡터 값이 최대인 절점에 적용한 값이다. 해석 모델의 종류는 <표 4.1>에서 보는바와 같다.

<표 4.1> 해석모델의 명칭

Load Mode	Shape				
	Perfect	Imperfect			
		Eigen mode - 1st		Eigen mode - 3rd	
		0.1 %	0.2 %	0.1 %	0.2 %
등분포	GRp0m0su	GRI1m1su	GRI2m1su	GRI1m3su	GRI2m3su
x축편심	GRp0m0sx	GRI1m1sx	GRI2m1sx	GRI1m3sx	GRI2m3sx
y축편심	GRp0m0sy	GRI1m1sy	GRI2m1sy	GRI1m3sy	GRI2m3sy

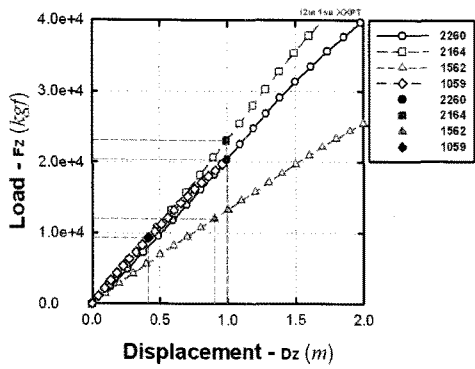
4.4 해석모델의 하중-변위 곡선

해석 모델의 거동을 알아보기 위해서<그림 4.3>에 보는 바와 같이 X 축 양의 방향과 음의 방향 그리고 Y축 양의 방향과 음의 방향 그리고 대각선 방향의 하중 변위를 상부절점과 하부절점으로 나누어 비교하였다.

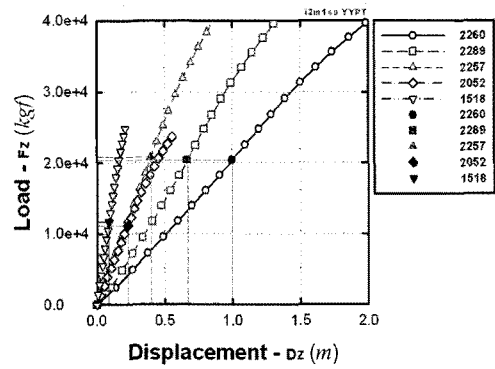


※참고 : XXPT - x축 양의 방향 상부절점  
 XXNT - x축 음의 방향 상부절점  
 YYPB - y축 양의 방향 하부절점  
 YYNB - y축 음의 방향 하부절점

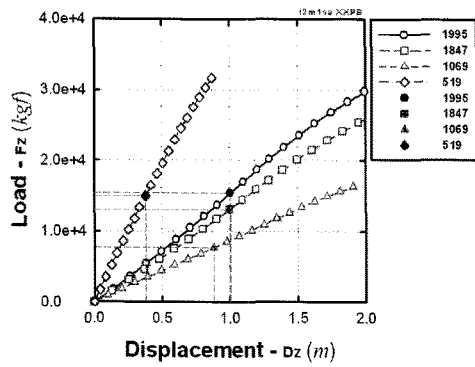
<그림 4.3> 서울 서남권 돔 야구장의 Node Layout



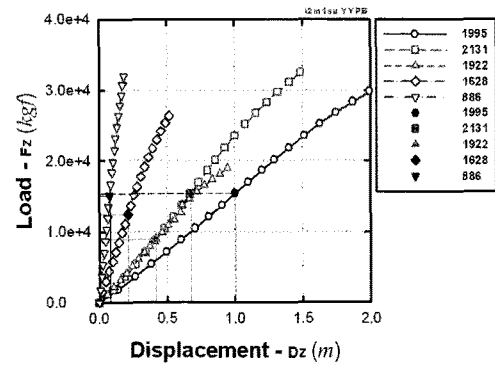
〈그림 4.4〉 GRI2m1su 모델의 XXPT 절점의 하중-변위 곡선



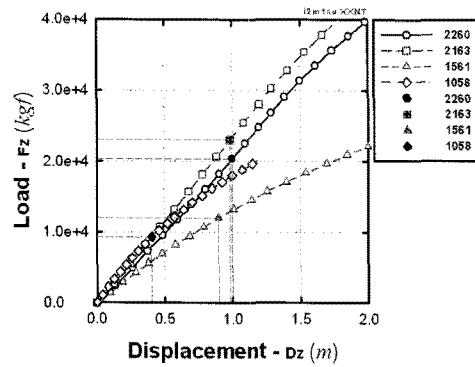
〈그림 4.8〉 GRI2m1su 모델의 YYPT 절점의 하중-변위 곡선



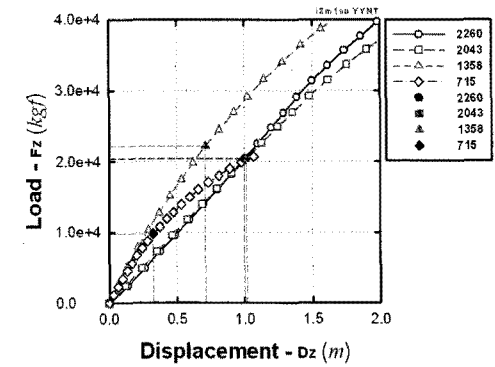
〈그림 4.5〉 GRI2m1su 모델의 XXPB 절점의 하중-변위 곡선



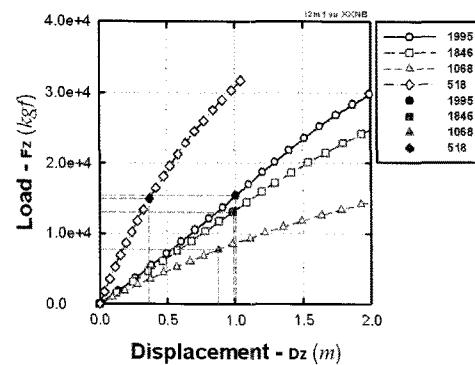
〈그림 4.9〉 GRI2m1su 모델의 YYPB 절점의 하중-변위 곡선



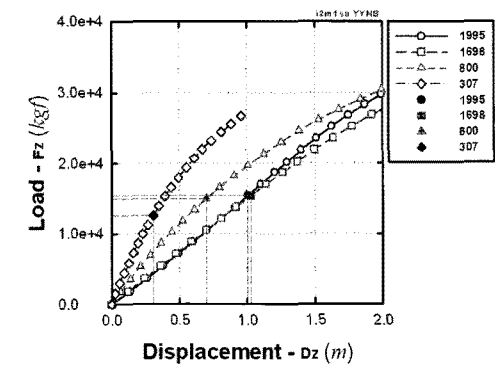
〈그림 4.6〉 GRI2m1su 모델의 XXNT 절점의 하중-변위 곡선



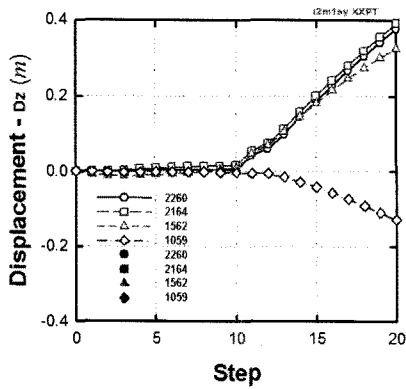
〈그림 4.10〉 GRI2m1su 모델의 YYNT 절점의 하중-변위 곡선



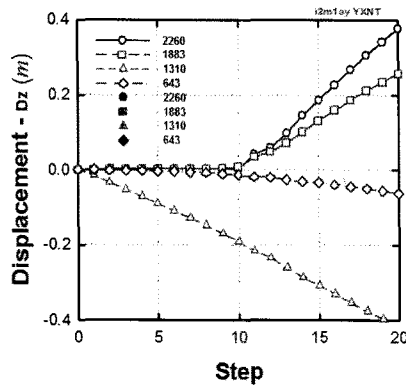
〈그림 4.7〉 GRI2m1su 모델의 XXNB 절점의 하중-변위 곡선



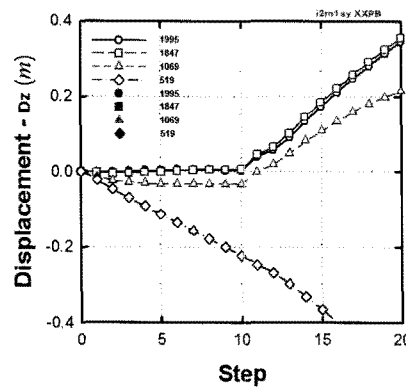
〈그림 4.11〉 GRI2m1su 모델의 YYNB 절점의 하중-변위 곡선



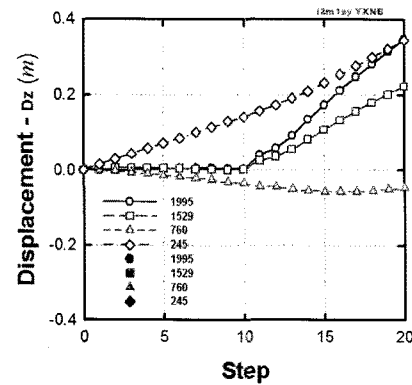
(a) XXPT 축방향



(b) YXNT 축방향



(c) XXPB 축방향



(d) YXNB 축방향

〈그림 4.12〉 GRI2m1su 모델의 스텝-변위 곡선

〈그림 4.4-4.11〉는 서울 서남권 돐 야구장에 등분포 하중 및 편심 하중 조건에 따라 완전형상과 불완전형상을 해석한 결과로 절점별 하중-변위 곡선이다. 〈그림 4.12〉의 절점별 스텝에 따른 x축 변위를 나타내 그래프이다. 〈표 4.2〉는 모델의 좌굴하중에 대한 설계하중을 알아보기 위한 것이며, 여기서 Design Load는 구조물의 지붕에 고정하중, 적재하중, 적설하중을 고려하였다.

〈표 4.2〉 모델의 좌굴하중에 대한 설계하중의 비 (Node 2260)

Model Name	Buckling Load(kgf) (B)	Displacement (m)	Design Load(kgf) (A)	Ratio (A/B)
GRp0m0su	27614	1.323	2649.8	9.596
GRp0m0sx	27514	1.319	2648.7	9.627
GRp0m0sy	27598	1.323	2648.6	9.597
GRI1m1su	25085	1.215	2649.8	10.563
GRI1m1sx	25039	1.212	2648.7	10.578
GRI1m1sy	22891	1.112	2648.6	11.570
GRI2m1su	20398	0.997	2649.8	12.990
GRI2m1sx	20384	0.997	2648.7	12.994
GRI2m1sy	20393	0.997	2648.6	12.988
GRI1m3su	23709	1.081	2649.8	11.176
GRI1m3sx	21876	1.029	2648.7	12.108
GRI1m3sy	23754	1.084	2648.6	11.150
GRI2m3su	21365	0.984	2649.8	12.403
GRI2m3sx	21355	0.984	2648.7	12.403
GRI2m3sy	21360	0.984	2648.6	12.400

불완전형상의 비선형해석 결과, 좌굴하중에 대한 설계하중비는 y축 편심하중이 작용하였을 때가 가장 불리함을 알 수 있었으며, 1st 모드에서 불완전성이 커짐에 따라 좌굴하중의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 구조물의 y축 편심하중에 대한 x축 방향 변위는 1310번, 1311번, 245번, 246번 절점이 가장 크게 나타남을 알 수 있으며, 휨의 전달에 있어 가장 민감한 거동을 나타냄을 알 수 있다.



## 5. 고 찰

본 논문은 서울 서남권 돔 야구장의 상부 구조시스템을 대상으로 구조불안정 거동을 조사하였다. 비선형해석에 필요한 해석프로그램은 다년간의 연구 집적으로 개발되었고, 다수의 논문으로 그 결과를 발표하여 검증된 NASS를 이용하였다.

해석 대상 모델은 힘을 전달할 수 있게 구조설계된 것이므로, 시공시 힘 전달이 충분할 것으로 가정하여 본 해석을 수행하였다. 또 본 연구에서는 돔형 구조물의 전체좌굴에 한정하여 구조불안정 거동을 조사하였다.

기학학적 비선형해석을 통해 구조불안정을 조사한 결과를 2260번 절점을 중심으로 표 4.2에 나타내었고, 다음과 같이 분석할 수 있었다.

- (1) 불완전형상의 비선형해석 결과, 좌굴하중에 대한 설계하중비는 y축 편심하중이 작용하였을 때가 가장 불리함을 알 수 있었다. 즉, 다양한 조건의 모델들에서, y축 편심 적설하중이 작용될 때가 등분포 적설하중이 작용될 때 보다 더 낮은 좌굴하중을 나타내며, 이때의 설계하중은 임계하중의 약 13% 정도가 된다.
- (2) 불완전성이 증가함에 따라 좌굴하중이 낮게 되며, 특히 1st 모드에서 불완전성이 커짐에 따라 좌굴하중의 변화가 크게 나타남을 알 수 있었다. 즉, 1st 모드의 불완전형상의 경우 0.1%의 불완전성에서 9% 이상, 0.2%의 불완전성에서 26% 이상 좌굴하중 값이 낮아진다. 또 3rd 모드의 불완전형상의 경우 0.1%의 불완전성에서 14% 이상, 0.2%의 불완전성에서 22% 이상 좌굴하중이 낮아진다.

따라서 Snapping에 관한 전체좌굴하중은 설계하중을 크게 상회하므로, 본 구조물은 전체좌굴에 관해 안정적인임을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Analysis, Design and Realization of Space Frames, IASS, Madrid, 1984
2. 日本建築學會 シェル空間構造運營委員會 スペースフレーム小委員會, 單層ラチスドームの安定解析, 日本建築學會, 1989
3. 金勝德, "偏平構造物の動的安定に関する研究," 東京大學 大學院, 博士學位論文, 1990.
4. 권택진, 김승덕, 최현식, 정명채, shell構造의 理論 및 應用, 전산구조공학회 기술강습회 교재 9-1, 한국전산구조공학회, 1994
5. 김승덕, 반강접합 프레임형 대공간 구조물의 비선형 불안정 해석에 관한 연구, 大韓建築學會論文集, 構造系, 18卷, 3號, 2002.3., pp.55-62.
6. 손수덕, 김승덕, 강문명, Flow Truss Dome 구조물의 비대칭 하중모드에 따른 불안정 현상에 관한 연구, 한국셀·공간구조학회 논문집, 2권, 4호, 2002.12., pp.61-76.
7. 손수덕, 김승덕, 강문명, 돔형 공간 구조물의 Rise-span 비에 따른 불안정 거동 특성에 관한 연구, 한국셀공간구조학회 학술 발표 논문집, 제1권, 제1호, 2004.5., pp.75-82.
8. 문혜수, 안상길, 손수덕, 이동우, 김승덕, 송도 컨벤션 센터의 초기형상불완전 및 절점강성에 따른 좌굴하중 특성에 관한 연구, 한국셀공간구조학회 학술발표회 논문집, 제3권, 제1호, 2006.5., pp.191-204.

- ▶ 접수일자 : 2010년 10월 26일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 12월 7일
- ▶ 게재 확정일자 : 2010년 12월 13일