

돔형 스페이스 프레임 구조물의 하중모드에 따른 분기점 특성에 관한 연구

A Study on the Critical Point and Bifurcation According to
Load Mode of Dome-Typed Space Frame Structures

손 수 덕*
Shon, Su-Deok

김 승 덕**
Kim, Seung-Deog

이 승 재***
Lee, Seung-Jae

김 종 식****
Kim, Jong-Sik

요 약

스페이스 프레임 구조물은 연속체 쉘 구조물의 원리를 이용하여 매우 넓은 공간을 효과적으로 덮을 수 있는 구조물이지만 뒹좌굴 및 분기좌굴 등과 같은 불안정거동은 돔형 구조물에서는 더욱 복잡하게 나타난다. 또한 붕괴메커니즘의 이론적 연구와 실험적 연구 결과들 사이에서도 많은 차이를 보인다. 본 논문에서는 미적 효과가 크며 단층의 대공간을 확보하기에 적합한 돔형 공간 구조물의 구조 불안정 특성을 접선강성방정식을 이용하여 비선형 증분해석을 수행하고, Rise-span(μ)비 및 하중모드(R_L)에 따른 임계점과 분기점의 특성을 돔형 공간구조물의 예제를 통해 고찰하였다. 여기서 불안정점은 증분해석과정을 통해서 예측할 수 있었으며, 예제에서 낮은 μ 에서는 전체좌굴이, 높은 μ 의 경우는 절점좌굴이 지배적이며, 낮은 R_L 에서 절점좌굴이, 높은 R_L 에서는 전체좌굴이 지배적이고, 전체좌굴이 나타나는 경우, 분기좌굴하중은 완전형상의 극한점좌굴하중의 약 50%에서 70%의 분포를 보였다.

Abstract

Space frame structures have the advantage of constructing a large space structures without column and it may be considered as a shell structure. Nevertheless, with the characteristics of thin and long term of spacing, the unstable problem of space structure could not be set up clearly, and there is a huge difference between theory and experiment. Therefore, in this work, the tangential stiffness matrix of space frame structures is studied to solve the instability problem, and the nonlinear incremental analysis of the structures considering rise-span ratio(μ) and the ratio of load(R_L) is performed for searching unstable points. Basing on the results of the example, global buckling can be happened by low rise-span ratio(μ), nodal buckling can be occurred by high rise-span ratio(μ). And in case of multi node space structure applying the ratio of load(R_L), the nodal buckling phenomenon occur at low the ratio of load(R_L), the global buckling occur at high the ratio of load(R_L). In case of the global buckling, the load of bifurcation is about from 50% to 70% of perfect one's snap-through load.

키워드 : 비선형 해석, 불안정 현상, 공간 구조물, 단층 래티스 돔, Rise-span 비, 하중모드

Keywords : Nonlinear analysis, Instability phenomenon, Spacial structures, Single layer lattice dome, Rise-span ratio, Load mode

1. 서 론

곡률을 가진 곡면구조 형태인 쉘 구조는 외부 하중에 대하여 효과 높게 저항할 수 있는 형태저항형 구조물이며, 가볍고 얇게 대공간을 만들 수 있는 장점을 갖고 있다. 이를 구조 시스템에 따라 보다 세

분하면 그림 1에서 보는 것과 같이 연속체 쉘 구조물, 스페이스 프레임 구조물, 막 구조물, 케이블 구조물 및 이들의 복합 구조체인 하이브리드 구조물로 분류할 수 있다.

강성구조 이산화 시스템인 공간 구조물은 매우 넓은 공간을 효과적으로 덮을 수 있는 구조물로 잘 알려져 있으며, 19세기에 이르러 콘크리트와 철의 개발로 훨씬 더 가볍고 긴 스패의 골조구조로 대체할 수 있게 해 주었다. 또한 계속된 재료와 제작기술 및 해석방법에서의 진전으로 연속체 돔은 점차

* 교신저자, (주)동성중공업 기술연구소, 공학박사
Tel: 053-753-4747 Fax:053-752-6867
E-mail : sdschon@gmail.com

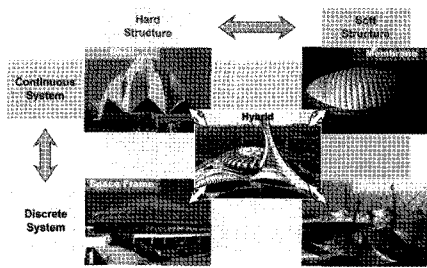
** 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사

*** 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사

****(주)동성중공업 기술연구소, 공학석사

래티스 셸 구조로 발전되어 갔다.

이런 셸 형태로 만들어진 공간 구조물은 경제적이라는 장점과 함께 구조불안정이란 중요한 문제를 구조물의 설계에서 해결하여야만 한다. 즉, 연속체 셸 구조의 원리에서 긴 경간을 얇게 만들면 뿔좌굴 및 분기좌굴 등과 같은 불안정거동이 나타나게 되며, 이산형 구조물에서는 더욱 복잡한 양상으로 일어난다. 또 셸형 구조시스템의 구조불안정 문제의 중요한 특징은 초기조건에 매우 민감하게 반응한다는 것이고, 이러한 문제들은 수학적으로는 비선형 문제에 귀착하게 된다.^[2]



〈그림 1〉 대공간 구조물의 분류

이러한 비선형성이 포함된 다양한 구조불안정 문제는 그간 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으나, 셸형 구조시스템에 관한 연구결과는 초기조건과 그 민감성에 의해 아직도 정립되지 못하고 있다.^[1] 이러한 민감성은 분기경로에 결정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 민감성에 대하여 불안정 경로에 대한 점선강성행렬의 특성이 연구되기도 하였다.^[6] 그리고 분기 해석에 관한 해석적 연구의 방법에 대한 고찰로 Y. Hangai^[8]가 분기점의 시작은 언제이며 평형경로의 진행 방향과 변화를 조사하는 일반역행렬 및 여러 가지 기법들에 대한 내용을 다루어 발표되었다. 최근에는 초기 형상의 불안전을 고려한 돔과 베럴볼트의 안정에 대한 파라미터를 다양하게 설정하여 거동과 민감성이 조사되고 있으며, 그러한 파라미터로서 하중과 경계조건, 높이, 좌굴모드 등이 거론되고 있다.^[7] 국내에서도 단층 래티스돔의 라이즈비에 대한 좌굴의 영향을 연속체 치환법과 유한요소법을 이용하여 연구 되었으며^[5], 아치의 라이즈비에 대한 불안정 거동에 대하여 연구도 발표 되었다.^[3] 이 외에도 래티스돔의 분기경로에 대해서 다분기 경로에 대한 해석 알고리즘인

선형호장법과 구형호장법의 비교를 다루어 연구 되었으며^[4], 현재 선진국에서도 이러한 부분들에 대하여 많은 연구결과 들을 발표하고 있다.

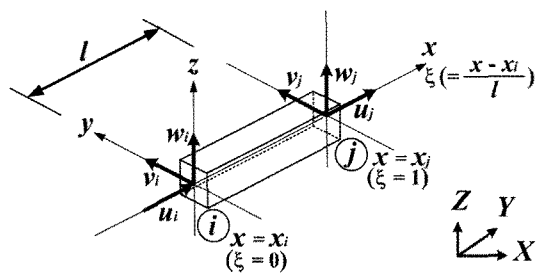
이러한 노력으로 공간 구조물의 많은 부분에서 발전을 가져왔으며, 공간 프레임 구조물은 현재 대공간 구조시스템에 있어서 가장 많이 사용되는 구조물로 자리잡게 되었다. 그러나 대공간 구조물에 대한 불안정거동은 공간 프레임 구조물에서는 더욱 복잡한 양상으로 나타나며, 이론적 연구와 실험적 연구의 결과들 사이에서도 많은 차이를 보이고 있다. 특히 프레임형 공간구조물의 경우 절점좌굴과 전체좌굴 및 부재좌굴의 형태로 좌굴거동이 발생하며, 각 현상과의 관계는 구조물이 복잡하여 질수록 명쾌한 규명은 매우 어렵다. 그 이유는 대부분의 복잡한 구조물은 상기 현상들이 서로 연관되어 발생하기 때문이고,^[7] 절점좌굴에서 전체좌굴로의 진행이나 분기점이 없는 뿔좌굴 및 분기경로를 가지는 경우의 불안정 평형경로들은 핀 절점구조물에서 매우 민감하게 발생하는 현상이다.

따라서, 본 논문에서는 미적 효과가 크며 단층의 대공간을 확보하기에 적합한 돔형 스페이스 프레임 구조물에 대해서 비선형 평형경로를 탐색할 수 있는 프로그램을 개발하고, 민감한 특성을 지닌 절점좌굴과 전체좌굴 및 각 좌굴현상의 연성으로 발생하는 구조 불안정 현상을 규명하고 분석한다. 여기서, 분석을 위한 파라미터로서 구조물의 Rise-span 비 및 하중모드를 채택하고, 구조물의 불안정점과 좌굴현상간의 불안정 특성이 좌굴하중레벨에 대한 영향을 비교, 고찰 한다. 연구에 있어서 저항내력 변화에 대한 셸형 구조물의 불안정거동은 주로 탄성영역에서의 불안전 거동이 중요한 파괴 메커니즘이므로, 비선형 거동 특성의 범위를 기하학적 문제로 접근하여 알아보도록 한다.

2. 점선강성행렬과 불안정거동

본 장에서는 기하학적 비선형을 고려한 공간 프레임 구조물의 선형화된 비선형 강성행렬을 구하기 위해 그림 2와 같이 요소 좌표계를 정의한다.

변형도-변위 관계식을 기하학적 비선형항을 포함



(그림 2) 좌표계와 절점자유도

하여 행렬로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\epsilon_x = A_1 d + \frac{1}{2} d^T B^T B d \quad (1)$$

여기서,

$$A_1 = [N_{i,x} \ 0 \ 0 \ N_{j,x} \ 0 \ 0]$$

$$B = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 & N_{j,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,x} & 0 & 0 & N_{j,x} & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,x} & 0 & 0 & N_{j,x} \end{bmatrix}$$

$$N_i = 1 - \xi, \ N_j = \xi, \ \xi = \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$$

응력도-변형도 관계식은 다음과 같이 채택한다.

$$\sigma_x = E \epsilon_x = E A_1 d + \frac{1}{2} E d^T B^T B d \quad (2)$$

현재의 상태를 초기상태로 가정하고, 증분에 관한 가상일의 원리를 적용하면 증분 단계별 평형관계식을 유도할 수 있다. 따라서 접선 강성방정식은 d 에 관한 고차항소거와 소거로 인한 불평형력을 r 로 다음과 같이 정의되어 진다.

$$f - r = [k_E + k_G] d \quad (3)$$

여기서,

$$k_E = A l E (A_1^T A_1) \quad k_G = A l (\sigma_x^{(0)} B^T B)$$

$$r = A l A_1^T \sigma_x^{(0)} - f^{(0)}$$

좌표변환행렬을 이용하여 전체좌표계의 증분구간에 관한 강성행렬을 나타내면 다음과 같은 선형화된 비선형 방정식을 구할 수 있다.

$$F - R = [K_E + K_G] D \quad (4)$$

여기서,

$$K_E = T^T k_E T : \text{탄성강성행렬}$$

$$K_G = T^T k_G T : \text{기하강성행렬}$$

식(4)의 접선강성행렬은 증분구간에서 구조물의 불안정 특성을 알 수 있으며, 비선형 평형궤도의 각 증분구간에서 접선강성행렬을 이용하여 임계하중에도달하였을 때의 좌굴점을 분류하기 위하여, 제1섭동 방정식을 다음과 같이 나타낸다.

$$K \dot{d} + f \lambda = 0 \quad (5)$$

여기서, 접선강성행렬 K 는 보존계에서는 대칭행렬이고, 직교변환행렬이 존재하므로, 따라서 대각화 가능행렬이 된다. K 의 n 개의 고유치 c_i 에 대응하는 정규화 고유벡터를 t_i 라하고, t_i 를 열벡터로 하는 변환행렬 T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_n] \quad (6)$$

여기서, T 는 직교행렬이며, 변환행렬 T 를 이용하여 변위벡터 \dot{d} 를 다음과 같이 \dot{u} 로 나타낸다.

$$\dot{d} = \begin{pmatrix} \dot{d}_1 \\ \Delta \dot{d} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ \Delta \dot{u} \end{pmatrix} = T \dot{u} \quad (7)$$

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(7)을 식(5)에 대입하고 양변에 T^T 를 곱하면,

$$T^T K T \dot{u} + T^T f \lambda = 0 \quad (8)$$

위 식에서 다음의 계수행렬을 정의한다.

$$g = T^T f = \begin{pmatrix} t_1 & f \\ t_2 & f \\ \vdots & f \\ t_n & f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ \Delta g \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$C = T^T K T = \begin{bmatrix} c_1 \text{ zero} \\ c_2 \\ \vdots \\ \text{zero } c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & \Delta C \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

$$\begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & \Delta C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ \Delta u \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} g_1 \\ \Delta g \end{Bmatrix} \lambda = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

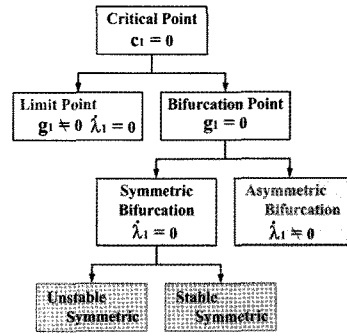
위 식에서 최소 고유치를 c_1 이라 할때, 특이점에 서는 $\det(K)=0$ 이므로 $\det(C)=0$ 이 성립하고, 따라서 $c_1=0$ 이 된다. 그러므로 식(11)의 첫 행 연산에 의해 다음의 관계가 성립한다.

$$g_1 \lambda = 0 \quad (12)$$

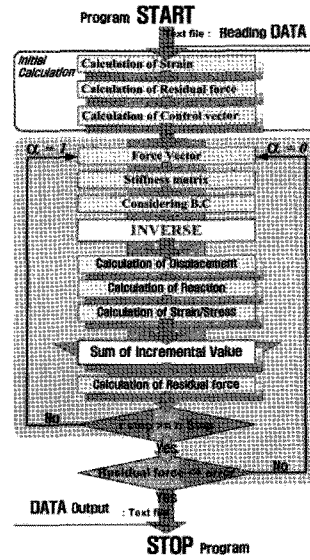
위 식의 λ 및 g_1 을 이용하면 그림 3(a)에서와 같이 좌굴점을 극한점(limit point), 분기(bifurcation) 및 대칭 안정점 및 불안정점으로 분류할 수 있다. 여기서 g_1 의 의미를 생각해보면, $g_1 = t_1 \cdot f$ 이므로, c_1 에 대응하는 고유행렬 t_1 과 하중모드 f 의 내적을 말하며, $g_1=0$ 이 되는 것은 두 벡터가 서로 직교함을 의미하게 된다.

따라서 $g_1=0$ 또는 $g_1 \neq 0$ 에 따라 임계점(critical point)을 각각 분기점과 극한점으로 분류할 수 있고, $g_1=0$ 인 경우가 분기점이 되며 분기좌굴을 발생시킨다. 이때 $\lambda=0$ 일 때가 대칭분기점이 되며, $\lambda \neq 0$ 일 때가 비대칭 분기점이 된다. 또 $g_1 \neq 0$ 인 경우에는 $\lambda=0$ 일 때가 극한점이 되며, 좌굴현상은 뿔좌굴(Snap-through)이 발생한다.

이와 같은 비선형 평형경로상의 불안정점을 판별하기 위해서는 그림 3(b)와 같이 접선강성행렬을 이용한 비선형 증분해석과, 각 증분해석에서 구하여진 접선강성행렬의 고유치 해석 및 행렬값을 분석하여야만 한다. 본 연구에서는 스페이스 프레임 구조물의 비선형 증분해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하고, 각 증분단계에서 접선강성행렬을 이용한 불안정점을 분석하도록 한다. 비선형 거동의 분석에서 증분 파라메타로는 변위를 이용하고, 임계점이나 불안정 분기점들에 대한 좌굴하중은 각 하중모드에 대한 하중 파라메타를 의미한다.



(a) 좌굴점의 분류



(b) flow-chart

〈그림 3〉 좌굴점의 분류와 비선형 증분해석

3. 공간구조물의 불안정 거동

공간 구조물은 외적인 여러 가지 요인으로 인하여 다양한 불안정 거동이 나타나지만 일반적으로 부재좌굴, 절점좌굴, 전체좌굴 그리고 좌굴의 복합적 형태의 거동을 한다. 이러한 현상들은 네트워크

〈표 1〉 해석 모델의 초기입력 값 및 변수

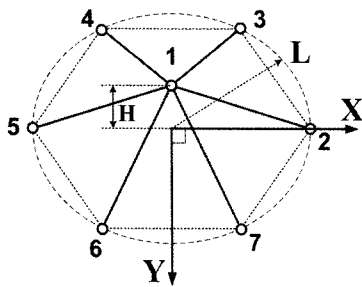
구조물의 밀면 반지름 (L)		500 cm
부재 물성치	탄성계수 (E)	2.1×10 ⁶ kgf/cm ²
	밀도 (ρ)	7.85×10 ⁻³ kgf/cm ²
	부재 단면적 (A)	11.2 cm ²
파라메타	라이즈-스팬비 (μ)	μ = H/2L (H:높이)
	하중비 (R _L)	R _L = 링 절점 하중 / 정점 하중

돔이나 볼트구조 시스템에서와 같은 많은 절점과 부재들로 구성된 경우 복합적인 형태의 거동을 하지만 단위 구조물의 형태에 있어서는 비교적 명확하고 독립적인 형태의 좌굴현상을 보인다.^[7]

본 장에서는 앞서 언급된 불안정 거동의 특성을 파악하기 위하여 단위 구조물의 불안정 경로를 살펴보고, 형상에 대하여 Rise-span 비 μ 를 그리고 하중에 대하여 하중비 R_L 을 파라메타로 설정하여 돔형 스페이스 프레임의 거동을 비교·분석한다. 해석 대상구조물은 돔의 형상을 위해 모든 절점이 구면의 정점과 링에 위치하며, 링의 수를 늘려서 해석 대상 모델을 구성하도록 한다. 또한 모든 예제의 공통된 초기입력 값 및 파라메타는 표1과 같다.

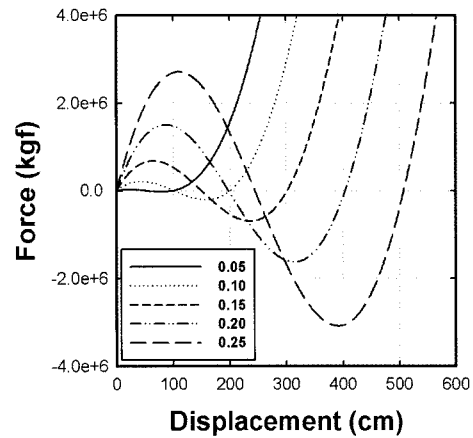
3.1 1-자유절점 단위모델

삼각형 네트워크 래티스 돔의 한 단위형태이기도 한 1-자유절점 단위모델은 정점에 위치한 하나의 자유절점과 링에 위치한 여섯 개의 경계절점으로 구성되며, 형상은 그림 4에서 보는 것과 같다. 하중은 1번 절점에 연직방향으로 집중력이 작용하며, 해석은 정점에 위치한 1번절점의 수직변위를 증분하여 해석을 수행한다.



〈그림 4〉 1-자유절점 단위모델 형상

모델의 라이즈-스팬비 μ 를 0.05에서 0.25까지 0.05씩 증가시켜 해석을 수행한 결과 그림 5에서 보는 것과 같이 임계점에서의 좌굴하중레벨값은 급격히 증가하지만, 불안정 거동에 대한 경로는 유사하게 나타난다. 또한 임계점의 발생위치는 표2에 나타난 바와 같이 μ 값에 무관하게 모델의 높이 H의 약 43.5%에 해당하는 지점에서 나타난다.



〈그림 5〉 μ 값에 따른 하중-변위곡선

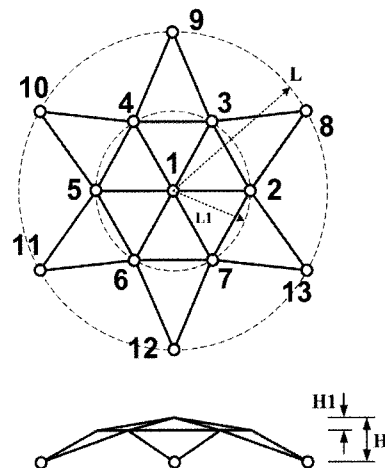
〈표 2〉 1-자유절점 단위모델의 좌굴하중 및 임계점

μ	H (cm)	임계점 (cm)	Pcr (kgf)	임계점/H
0.05	50	22.0	28281.59	44.0 %
0.1	100	43.0	213895.2	43.0 %
0.15	150	65.0	681055.0	43.3 %
0.2	200	87.0	1504485.0	43.5 %
0.25	250	110.0	2705262.0	44.0 %

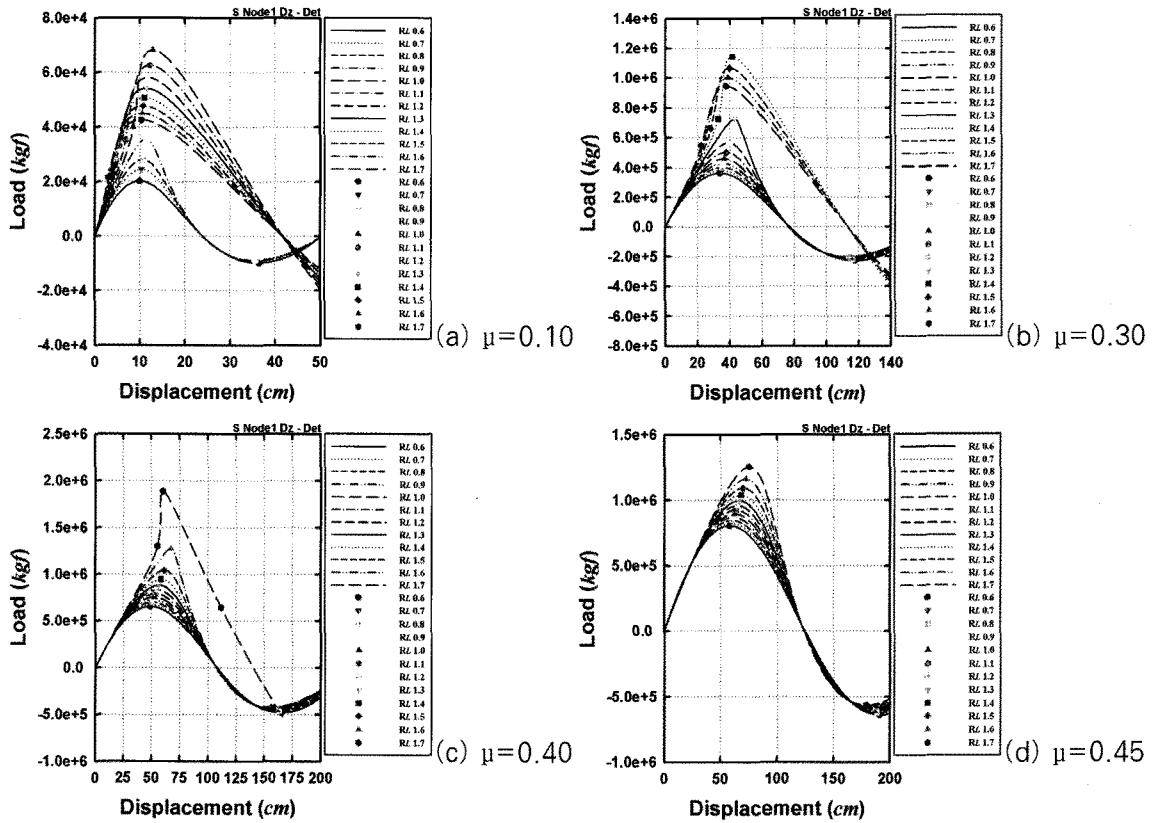
3.2 2-링 스페이스 프레임 구조물(스타 돔)

2-링 스페이스 프레임 구조물은 단위모델의 거동에 비해 더 복잡한 양상의 불안정 거동을 보이지만 비교적 그 현상이 뚜렷이 나타난다.

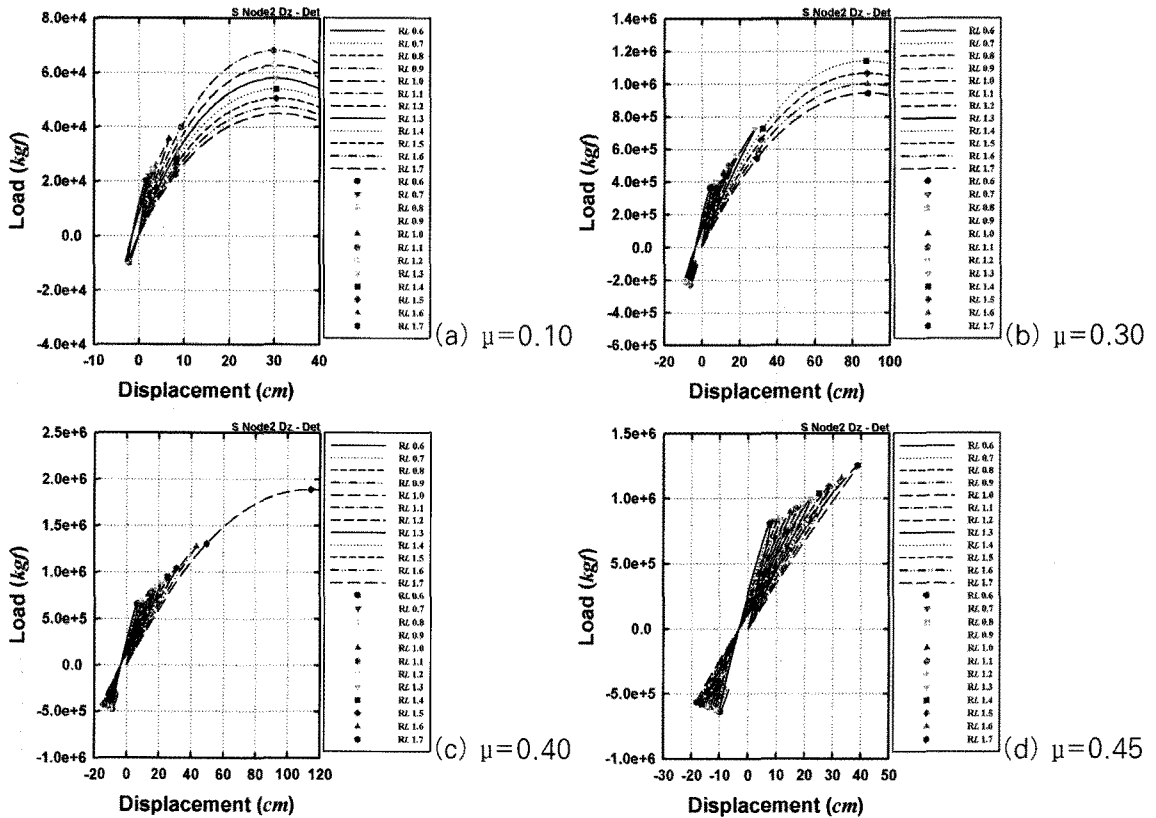
모델의 형상은 그림 6에서 보는바와 같고, L1과 L에 위치한 링과 정점은 돔의 구면중심에서 동일한



〈그림 6〉 2-링 예제의 형상



〈그림 7〉 2-링 예제의 하중-변위 곡선 (Node 1-Dz)



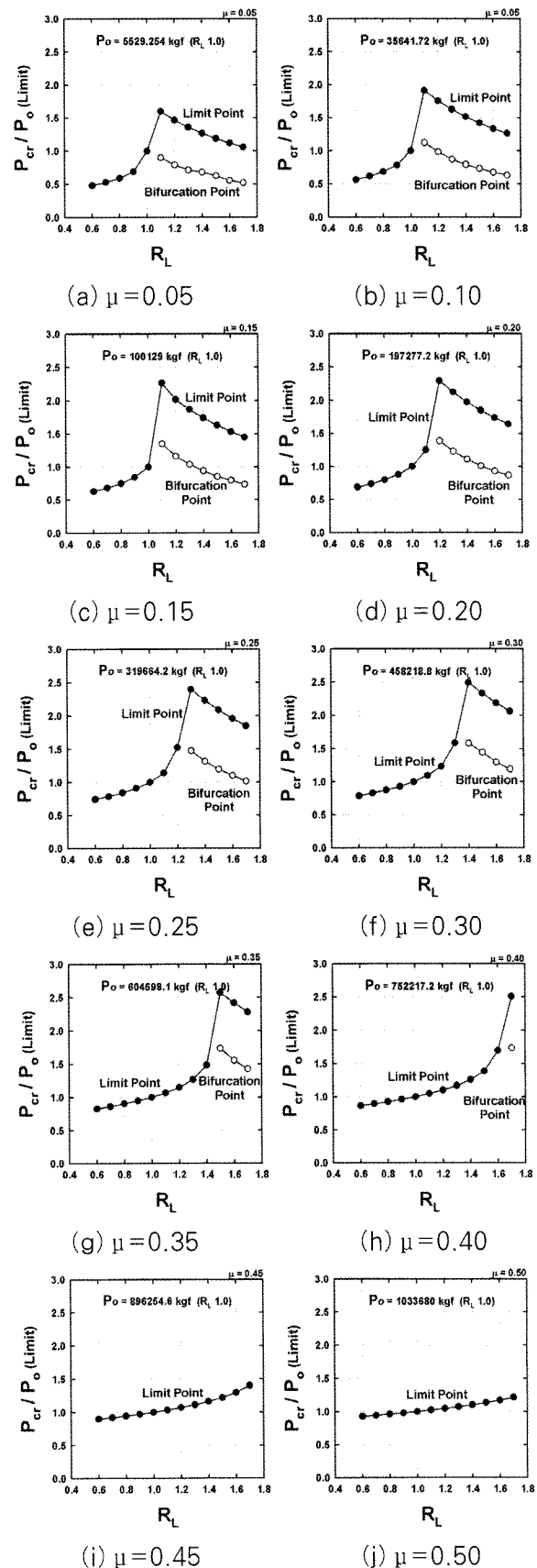
〈그림 8〉 2-링 예제의 하중-변위 곡선 (Node 2-Dz)

각도로 배치된다. 해석을 위해 채택되는 모델의 Rise-span비 μ 는 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5로 선정하며, 하중비 R_L 의 값은 0.6에서 1.7까지 0.1씩 증가시켜 증분해석을 수행한다. 하중비 R_L 이 1 을 초과하는 경우는 1번절점의 하중보다 2번절점의 하중이 큰 경우를 의미하며, 미만인 경우는 1번절점의 하중이 큰 경우를 의미한다. 또한 1번절점의 하중에 대한 면적은 2번절점의 하중에 대한 면적에 비하여 라이즈-스팬비 μ 값의 증가에 따라 다소 증가하나, 비교적 1:1의 비율이다.

해석결과로 그림 7과 8은 하중비의 변화에 대한 1번과 2번 절점의 하중-변위 곡선을 나타내었고, 곡선상의 다각형의 점들은 행렬식의 특이점을 나타내는 부분이다. 각각의 Rise-span비에 대한 해석결과에서 하중비 R_L 의 증가는 일정한 부분까지 극한점의 하중레벨은 증가하지만 일정구간을 넘어서게 되면 극한점의 하중레벨은 급격히 상승 이후에 다시 감소하게 된다. 급격한 상승을 하며 다시 감소하는 구간에 대하여는 모든 경우에 있어서 하중-변위 곡선 상에 분기점을 가지게 된다. 이는 구조물의 불안정 현상이 절점좌굴에서 전체좌굴 형태로의 변환을 가져오며, 이러한 것은 2번절점의 하중-변위 곡선의 거동에서 명확히 나타난다. 즉, 낮은 하중비(R_L)에서 2번절점의 수직변위는 극한점이 발생하는 지점에서 역방향으로 진행하기 시작하며, 분기점이 나타나는 하중비(R_L)의 경우에는 역방향으로 진행되는 양상이 나타나지 않는다.

그러나 이것은 모든 Rise-span비의 해석결과에서 동일한 현상으로 나타나는 것은 아니다. 그림 8에서 보는바와 같이 Rise-span비가 증가하는 경우에 극한점의 급격한 하중레벨증가는 하중비 또한 높은 경우에서 발생하였으며, Rise-span비가 0.45이상인 이러한 현상이 발생하지 않았다. 즉, 2번절점의 하중-변위 곡선은 모두 역방향으로의 진행곡선만을 나타낸다. 이러한 현상은 높은 Rise-span비에서는 좌굴현상의 변환점이 되는 하중비 또한 높은 값을 지닌 것으로 보인다.

또한, 해석을 수행한 공간구조물의 면적비에 가까운 하중비인 $R_L=1$ 이하의 값에서는 모두 절점좌굴의 형태를 보이고 있으며, 이는 중앙부의 하중이 커



<그림 9> 2-링 예제의 R_L 값에 대한 좌굴하중

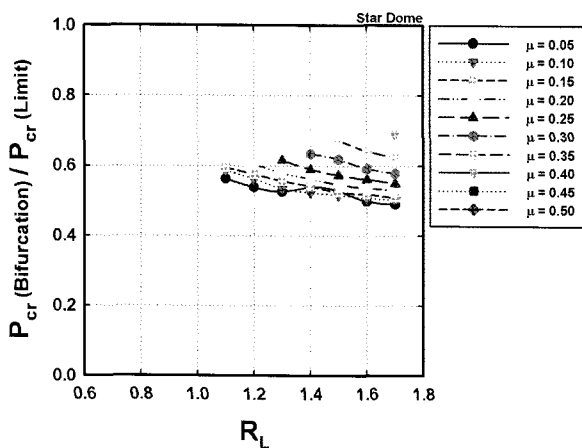
지는 경우 1번절점의 국부적인 좌굴만이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 전체좌굴이 발생하는 하중비 R_L 의 값은 모두 1 이상의 범위에서 발생한다.

그림 9는 해석모델의 좌굴하중을 하중비 $R_L=1$ 일 때 극한점의 좌굴하중으로 무차원화하여 나타낸 그림이며, 여기서 $R_L=1$ 이 의미하는 것은 모든 절점에서 동일한 하중이 적용될 때를 의미한다.

먼저, 하중비(R_L)가 1 이하의 모델의 해석결과는 모두 분기점이 발생하지 않고 좌굴하중비는 하중비의 감소에 따라 감소한다. 하중비(R_L)가 1 이상의 구간에서도 분기점이 발생하기 전에 하중비의 증가는 좌굴하중도 또한 증가한다. 이것은 절점좌굴이 발생하는 구간에서 하중비의 감소는 좌굴하중이 감소하는 양상을 보여주고 있는 것이다.

분기점 발생 구간에서의 하중비는 Rise-span비(μ)에 따라 차이는 있지만 Rise-span비(μ)가 0.05에서 0.15사이(그림 9 a,b,c)는 하중비 R_L 이 1.1에서 발생하며, Rise-span비(μ)가 0.2 이상(그림 9 d,e,f,g,h)에서는 점차적으로 분기점이 발생하는 하중비는 높아져 Rise-span비(μ)가 0.45이상(그림 9 i,j)에서는 나타나지 않는다. 이러한 극한점 이전에 분기점이 발생하는 것은 앞서 언급한 바와 같이 절점좌굴에서 전체좌굴로 변환되는 점을 의미하며, 전체좌굴이 발생하는 구간은 분기좌굴에 의해 불안정 거동이 진행되는 것을 예측할 수 있다.

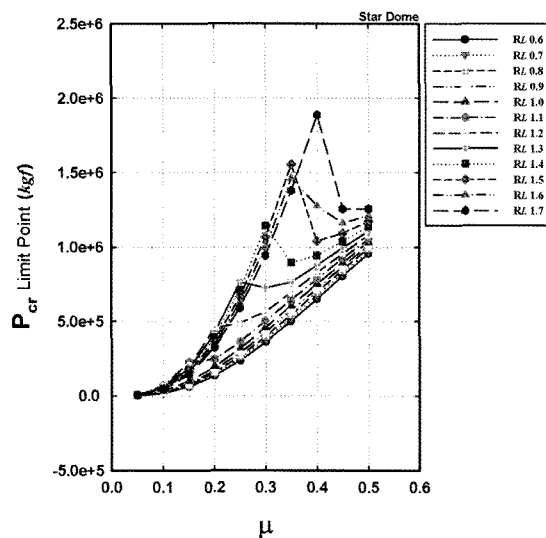
따라서, 하중비 R_L 의 증가는 분기점이 나타나기 전까지의 범위에서는 좌굴하중이 증가하지만, 분기



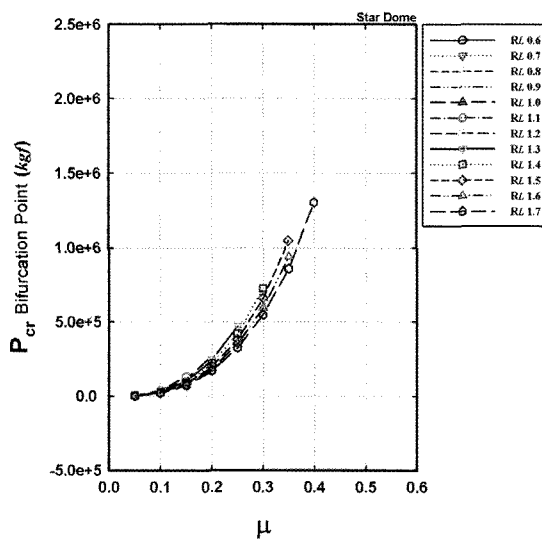
〈그림 10〉 2-링 예제의 R_L 값에 대한 분기좌굴하중과 뿔좌굴하중에 대한 비

점이 나타난 이후에는 좌굴하중이 감소하며 좌굴현상은 분기좌굴현상이 나타난다.

분기좌굴에 의한 좌굴하중비를 조사하기 위하여, 그림 10에서는 분기점에서의 하중레벨을 극한점에서의 하중레벨로 무차원화하여 나타내었다. 여기서, 하중비 R_L 의 증가에 있어서 분기점의 하중레벨은 극한점에 대한 하중레벨의 약49%에서 69%의 분포를 나타내고 있다. 또한 하중비의 증가에 대한 좌굴하중비의 곡선은 완만한 감소곡선을 보이고 있으며, 분기점이 나타나는 위치의 좌굴하중비는 Rise-span비(μ)가 클수록 증가한다.



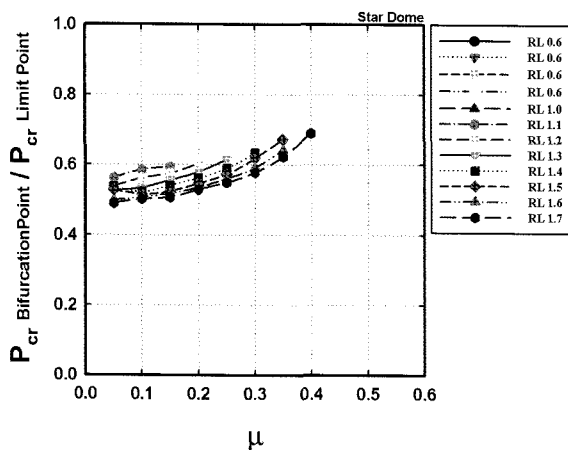
(b) 임계좌굴하중



(b) 분기좌굴하중

〈그림 11〉 2-링 예제의 μ 값에 대한 좌굴하중

Rise-span비(μ)에 대한 불안정 현상을 알아보기 위해서, 그림 11에 μ 의 변화에 대한 좌굴하중을 나타내었다. 그림 11에서 나타나듯이 극한점의 좌굴하중(그림 11 a)나 분기점의 좌굴하중(그림 11 b)은 모두 Rise-span비(μ)의 증가에 대해 증가곡선을 보이지만, 극한점 좌굴하중에서는 하중비(R_L)의 값이 높은 경우에 급작스런 상승점을 나타내며, 다시 감소하여 증가하는 양상을 보이고 있다. 또한 Rise-span비(μ)의 증가에 대해서 좌굴하중은 증가하나, Rise-span비(μ)가 높아질수록 분기점은 더 이상 나타나지 않고 있다. 그리고 $R_L=1$ 이하의 모든 분기점이 발생하지 않으며, Rise-span비(μ)의 증가에 대해 좌굴하중레벨도 증가한다. 또한 좌굴하중의 증가곡선 상에서의 급격히 상승하며 감소하는 변곡점을 보이지 않는다. 이는 극한점의 하중레벨이 변곡점을 나타내는 양상은 분기점이 나타나는 시점에서 발생하기 때문이다. 그리고 $R_L=1.1$ 이상에서 Rise-span비(μ)가 증가할수록 분기점은 사라지며, R_L 의 지속적인 증가는 더 높은 Rise-span비(μ)에서 분기점이 사라지는 현상이 나타난다. 즉, 이러한 현상은 높은 Rise-span비(μ)에서 절점좌굴이 발생하며, 낮은 Rise-span비(μ)에서는 전체좌굴이 발생하는 것을 의미한다.



〈그림 12〉 2-링 예제의 μ 값에 대한 분기좌굴하중의 뿔좌굴하중에 대한 비

Rise-span비(μ)의 변화에 대한 분기좌굴하중의 특성을 알아보기 위해서 분기점의 하중레벨을 극한점 하중레벨인 뿔좌굴하중으로 무차원화하여 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 나타난 바와 같이

Rise-span비(μ)의 증가에서는 분기좌굴현상이 나타나지 않으며, 발생하는 분기좌굴하중은 뿔좌굴하중값의 약 50%에서 70%의 범위를 가진다.

4. 결 론

대공간 구조물 중에서 강성계 이산화 구조시스템으로 분류되는 스페이스 프레임 구조물을 대상으로 불안정 현상을 연구하였다. 변위증분을 통한 비선형 해석과 각 증분점의 불안정현상에 대한 판별을 통하여 임계점 특성을 단층 돔형 구조물의 예제를 통하여 살펴 보았다. 여기서 고려되어지는 조건은 하중모드비(R_L)와 Rise-span비 μ 이며, 해석결과를 중심으로 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

- 극한점 이전에 분기점이 나타나는 경우에 구조물은 분기좌굴의 불안정 거동을 하며, 좌굴경로는 분기점에서 초기 형상 불완전성에 따른 분기 궤적으로서의 불안정 거동을 예상할 수 있다.
- 단층의 경우 예제에서 볼 때 낮은 Rise-span비 μ 에서는 전체좌굴현상이 지배적이며, 높은 μ 에서는 절점좌굴현상이 지배적이다. 또 하중비 R_L 에 대한 다자유절점 공간구조물의 경우, 낮은 하중비 R_L 에서 절점좌굴현상이 지배적이며, 높은 R_L 에서는 전체좌굴현상이 지배적이다.
- 전체좌굴현상이 나타나는 경우, 분기좌굴하중은 완전형상일 때 극한점좌굴하중의 약 50%에서 70%의 분포를 보였다.

이상으로 돔형 스페이스 프레임 구조물의 하중모드에 대한 임계점의 특성에 관하여 정리하였다. 이러한 특성 외에 구조체가 매우 복잡할수록 부재좌굴로 인한 전체좌굴의 영향이나 좌굴현상의 복합적인 불안정 거동은 매우 다양하다.

감사의글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호 #06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 권택진, 김승덕, 김종민, "기하학적 비선형을 고려한 편집합 단층래티스돔의 불안정 거동에 관한 연구," 한국전산구조공학회 학술발표회논문집, 제10권 제1집, 1997, pp.240-247.
2. 권택진, 한상을, 최현식, 김승덕, 정명채, 서삼열, 셸 구조론 - 한국전산구조공학회 편, 기문당, 1998.
3. 김승덕, 박지윤, 권택진, "얇은 정현형 아치의 불안정 거동에 관한 연구(1) : 형상특성에 따른 정적좌굴의 분류," 한국전산구조공학회논문집, 12권 3호, 1999.9, pp.407-415.
4. 윤환흠, 한상을, "래티스돔의 다분기 해석을 위한 알고리즘에 관한 연구," 대한건축학회 논문집 구조계, 제16권 9호, 2000, pp.3-9.
5. 정환목, 권영환, 이승재, "단층 래티스 돔의 좌굴 특성에 관한 연구-라이즈비의 영향," 전산구조공학회 학술발표회논문집, 1992.10, pp.127-132
6. Bergan, P. G., "Solution algorithms for nonlinear structural problems," Computers and Structures, Vol.12, 1980, pp.497-509.
7. Bulenda, Th. and Knippers, J., "Stability of grid shells," Computers and Structures, Vol. 79, 2001, pp.1161-1174.
8. Choong, K. K. and Hangai, Y., "Review on methods of bifurcation analysis for geometrically nonlinear structures," IASS, Vol.34, No.112, 1993, pp.133-149.
9. Coan, Christopher H. and Plaut, Raymond H., "Dynamic stability of a lattice dome," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, 1983, pp.269-274.
10. Hill, Christopher D., Blandford, George E. and Wang, Shien T., "Post-buckling analysis of steel space trusses," Journal of Structural Engineering, vol. 115, No. 4, 1989.4, pp.900-919.
11. Kollar, Lajos and Hegedus, Istvan, Analysis and Design of Space Frames by the Continuum Method, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands, 1985.
12. 金勝德, "扁平構造物の動的安定に関する研究," 東京大学 大学院, 博士学位論文, 1990.

▶접수일자 : 2010년 11월 17일
 ▶심사 완료일자 : 2011년 1월 28일
 ▶게재 확정일자 : 2011년 2월 16일