

# 비대칭 적설하중 적용을 통한 단층 래티스 지붕 구조물의 좌굴하중 특성

## Buckling Load of Single-layered Lattice Roof Structure Considering Asymmetric Snow Load

황 경 주\*      이 승 재\*\*      손 수 덕\*\*\*  
Hwang, Kyung-Ju      Lee, Seung-Jae      Shon, Su-Deok

### Abstract

A single-layered steel lattice roof, which has 50m span, was constructed. In order to figure out the realistic buckling load level, the structural analysis of this roof structure was performed especially by local snow load. Due to the characteristics of application of snow load, the load combinations of snow should be considered not only global area but also local part so that the critical buckling load could be observed as easy as possible. Geometrical imperfection was simulated to consider inaccurate shape of structure. And then nonlinear analysis were performed. Finally, this paper could investigate that the local snow load with geometrical imperfection decreased the level of buckling load significantly.

*Keywords: Single-layered, Local snow load, Lattice structure, Geometrical imperfection*

### 1. 서 론

최근 충청북도 천안시에 배구연습장과 기숙사 용도를 수용하는 복합체육시설이 완공이 되었다. 캐슬 오브스카이워커스라는 이름을 갖는 이 건물은 2차 평면을 갖는 내력벽과 기둥-보 골조시스템이 어우러진 4층 규모의 기숙사 시설과 가운데 중정을 배구 연습장으로 활용하고 있다. 특히, 이 건물을 덮고 있는 지붕은 단일 부재가 지붕의 골조 면을 형성하고 있는 단층 래티스 구조로 이루어져 있다 <Fig. 1,2>. 단층 래티스 구조물은 일반적인 복층 래티스 구조물에 비해 뿔좌굴 및 분기좌굴의 민감도가 훨씬 높으며 이는 전체 래티스 부재의 설계를 위한 좌굴하중을 낮추는 역할을 한다는 것은 이미 많은 문

헌을 통해서 발표되었다.<sup>[4][10]</sup> 이러한 좌굴현상의 매커니즘을 유발하는 요소로는 구조물의 rise-span 비율, 각 부재의 강성비, 합리적인 접합부 강성의 적용 그리고 초기형상 불완전(Geometrical initial imperfection)등으로 알려져 있다.<sup>[1][2]</sup> 무엇보다 특정하중의 비대칭적 재하는 전체 구조물의 응력 매커니즘을 멤브레인 응력상태에서 휨모멘트 상태로의 전환을 가속화시키기 때문에 해석상 혹은 설계상에서 반드시 고려되어야 하는 문제이다. 이러한 비대칭적으로 가해지는 하중요소가운데 설계자가 예상할 수 있는 대표적인 것으로는 적설하중이다. 하지만 현재적으로 건축구조법규에 근거한 적설하중의 하중조합에서 비대칭적 혹은 국부적 적설하중의 적용은 제시되어 있지 않으며 이는 단층 래티스 구조물의 해석 및 설계에서의 불합리성을 야기시키고 있다.

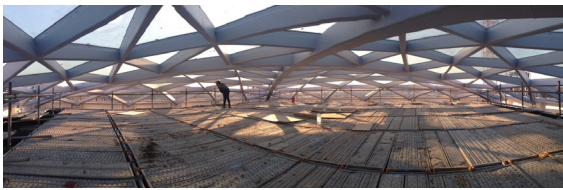
따라서 본 연구에서는 실제 시공된 단층 래티스 지붕구조물을 대상으로 하여 대칭 및 비대칭 국부 적설하중이 단층 래티스 지붕 구조물의 좌굴하중에 어떠한 영향을 미치는지 평가하여 구조물의 좌굴

\* 주저자, 정회원, 서울시립대학교 건축학부 조교수, 공학박사  
School of Arch. University of Seoul  
\*\* 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사  
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education  
\*\*\* 교신저자, 한국기술교육대학교 건축공학부 연구교수, 공학박사  
School of Arch. Eng., Korea Univ. of Tech. & Education  
Tel: 041-560-1334 Fax: 041-560-1224  
E-mail: sdshon@koreatech.ac.kr

민감도를 평가하고 향후 실무적 설계에 도움을 주고자 한다.



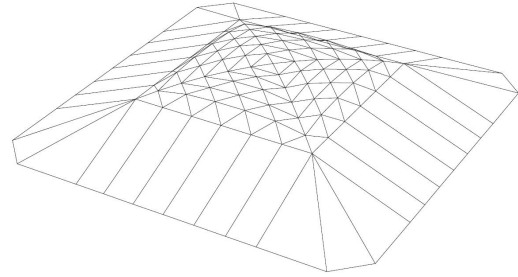
〈Fig. 1〉 Inside view of building



〈Fig. 2〉 Grid view on the roof

## 2. 단층 래티스 지붕의 구성

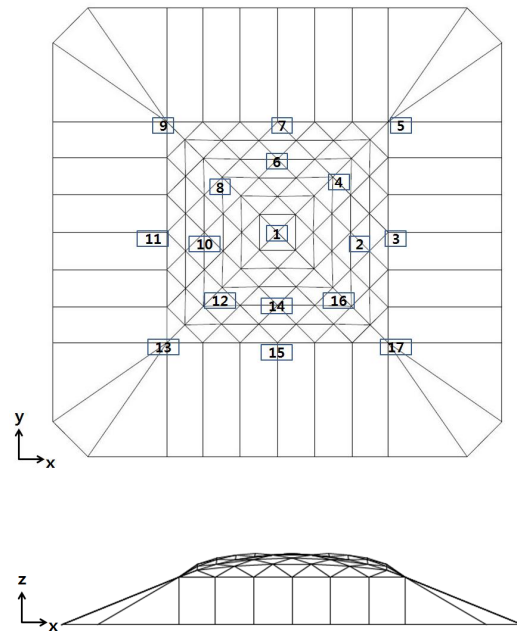
〈Fig. 3〉에서 보는 바와 같이, 지붕의 기하학적 특성은 삼각의 기본 그리드를 갖고 있는 지붕 중앙부와 전체 지붕면의 대각선을 가로지르는 압축리브 부재가 위치해 있다. 이 압축리브 부재를 지탱하고 있는 여덟 개의 캔틸레버 부재는 건물 평면의 모서리에 위치해 있는 SRC 기둥에 정착되어 있으며 압축리브 부재를 지탱하고 있다. 기본적인 중력 방향의 하중 경로는 자연스럽게 지붕의 각 면, 압축리브, 캔틸레버부재, SRC 기둥 그리고 기초에 전달되게 되어 있다. 지붕의 규모는 평면상에서 좌우 각각 35m이며 대각선 방향으로로는 약 50m이며 지붕 바닥의 수평면에서 지붕의 가장 상부까지의 높이는 6m이다. 최적의 rise-span비를 위해 다양한 높이가 고려되었으며 건축 디자인적 요구와 구조적 안정성을 고려하여 최종적인 rise-span비는 0.12로 시공되었다.



〈Fig. 3〉 Shape and grid pattern of roof

## 3. 수치해석 개요

구조물의 하중과 변위의 관계를 살펴보기 위해 기본적인 철골구조설계에서의 하중조합을 적용한 선형해석에서 나타난 변형이 큰 절점들을 선별하여 〈Fig. 4〉에서 보는바와 같이, 대칭성을 고려하여 모두 17개의 절점을 선정하여서 알아보기로 했다. 해석에 적용된 경계조건은 모두 Fixed end 상태이며 이는 실제 시공된 디테일과 동일하게 적용하였다. 해석에 적용된 부재의 단면은 모든 부재가 동일하게 200×100×0.9의 단면을 갖는 각형강관이다.

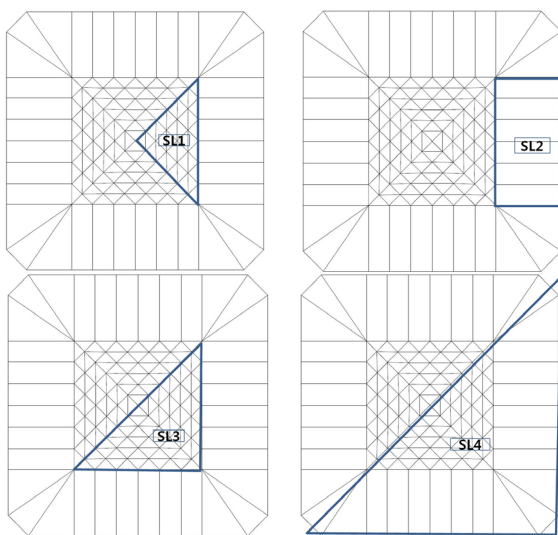


〈Fig. 4〉 Nodal points of analysis

모든 지붕재료의 물성치는 탄성계수는 210,000 MPa 이며 포아송비는 0.3, 그리고 밀도는 76.93kN/m<sup>3</sup>이다. 재료적 비선형은 고려되지 않았으며 상용 프로그램인 ANSYS를 통해서 기하학적 비선형만 고려하여 해석을 수행했다.

<Table 1> Load combination

No.	Load combination	Contents	EA
1	gLCB1	1.4DL+1.6SLF	1
2	gLCB2	1.4DL+1.6SL1	1
3	gLCB3	1.4DL+1.6SL2	1
4	gLCB4	1.4DL+1.6SL3	1
5	gLCB5	1.4DL+1.6SL4	1



<Fig. 5> Load cases with asymmetric snow load

적용된 하중에 대해서는 일반적으로 구조물의 지붕에서 고려하는 설계하중은 고정하중(DL), 적재하중(LL), 적설하중(SL) 그리고 풍하중(WL)이지만, 본 연구에서는 적설하중의 비대칭 증분에 대한 영향을 보기 위해 DL과 SL에 대해서만 적용한다. 적설 하중의 양은 구조물이 시공된 지역인 천안시의 적설하중 계수와 노출계수 등을 고려하여 1.39kN/m<sup>2</sup>이다. <Fig. 5>에서 보는바와 같이, 비대칭 적설하중은 4가지 경우를 가정하며 덧붙여 눈이 전체 지붕에 대칭적으로 균일하게 증분이 되는 것을 고려하

여 전체 5개의 하중조합을 가정하였다. 첫째(SLF)는 적설하중이 국부적으로 비대칭의 하중 매커니즘을 갖는 것이 아니라 지붕 전체에서 작용하는 것을 나타내며, 둘째(SL1)는 상부 그리드의 1/4에 해당하는 부분에 적설이 집중되는 것을 가정한다. 세 번째 가정(SL2)은 상부 그리드의 끝단에서 하부 경계지점까지이다. 네 번째 가정(SL3)은 상부 그리드의 1/2에 해당하는 부분에 적설의 증분을 가정하며 마지막으로 SL4는 전체 지붕의 50%에 해당되는 부분이 적설 되는 가정을 나타낸다. 각 하중조합의 임계 좌굴하중 레벨과 변위를 파악하기 위하여 하중요소(LF)와 변위의 관계 그래프를 구하였다. 1.4DL+1.6SL의 하중조합을 1로 가정하여 적설하중 요소에 해당하는 1.6SL만을 배수의 개념으로 증분 하였다. 예를 들어 LF=2는 1.4DL+3.2SL을 나타낸다. 비대칭 적설하중에 대한 좌굴하중과 변위의 순수한 영향을 파악하기 위해 부재의 좌굴에 대한 내용은 제외하였다.

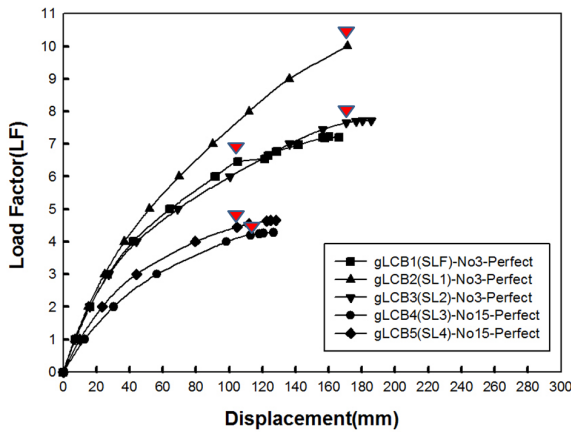
#### 4. 수치해석 결과

수치해석에 사용된 모델은 완전형상과 초기형상 불완전 모델을 각각 적용하였다. 완전형상은 설계상의 모든 부재들의 좌표가 완벽하게 시공되었다는 전제이며 초기형상불완전은 실제로 정해진 부재들의 좌표가 여러 가지 이유로 기하학적 오차를 가지고 시공되었다는 것을 가정한다. 다른 논문들을 통해서 초기형상불완전 모델이 좌굴하중에 매우 민감한 것들이 연구되었으며<sup>[11-13]</sup> 본 논문에서도 비대칭 적설하중의 증분이 기하학적 오차를 갖는 지붕의 좌굴하중 민감도를 알아보기 위해 초기형상불완전 모델을 적용한다.

##### 4.1 완전형상을 고려한 해석 결과

<Fig. 6>은 완전형상의 모델에서 비대칭 적설하중을 고려하여 기하학적 비선형해석을 수행한 하중요소와 z 방향의 변위의 관계 그래프를 나타내고 있다. 각각의 하중조합에서 최대 변위를 나타내는

절점을 선택하여 그래프에 나타내었다. 또한 역삼각형 표시로 좌굴하중의 임계 레벨을 표시하였다. 적설하중이 지붕 전체에 대칭적으로 증분되고 있을 때의 하중조합인 gLCB1의 경우를 기준으로 보았을 때 다음과 같은 양상을 보이고 있다. gLCB2의 경우는 gLCB1보다 좌굴하중이 오히려 높게 나타나고 있으며 gLCB3은 gLCB1보다 좌굴하중은 다소 높으나 거의 비슷한 그래프를 나타내고 있다. 이는 비록 국부적 비대칭적 적설하중으로 가정하여 하중을 증분 했을지라도 국부적 재하면적이 충분치 않으면 대칭적으로 증분되는 경우(gLCB1)보다 좌굴하중 레벨이 낮아지지 않는 것으로 분석된다.



〈Fig. 6〉 LF-Displacement curves with asymmetric snow load(perfect model)

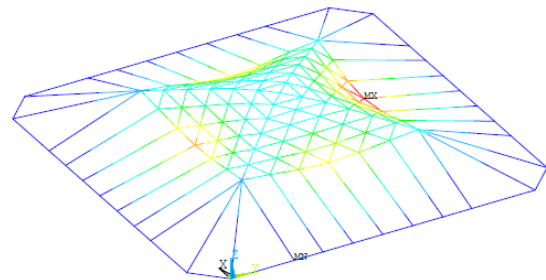
반면에 gLCB4,5의 경우는 gLCB1의 경우보다 현격하게 낮은 좌굴하중 양상을 보이고 있으며, 특히 gLCB4의 경우 약 21% 가량 낮은 좌굴하중을 나타내고 있다. 이는 비대칭 적설하중의 면적이 전체 지붕 면적의 일정량이 되면 지붕 부재의 모멘트의 발생을 가속화하기 때문으로 보인다.

<Table 2>에서는 좌굴하중, 최대변위, 설계하중 그리고 좌굴상태에서의 최대 부재 모멘트를 수치적으로 나타내고 있다. 여기서 좌굴하중은 LF가 임계점에 도달했을 때의 축력을 나타내며 설계하중은 LF=1에서의 축력을 나타낸다. gLCB4,5의 경우 buckling 상태에서의 최대 모멘트가 각각 5.94kNm, 4.72kNm로써 다른 경우의 모델보다 약 2배 가까운 모멘트가 작은 변위 값에서 발생된 것을 알 수 있

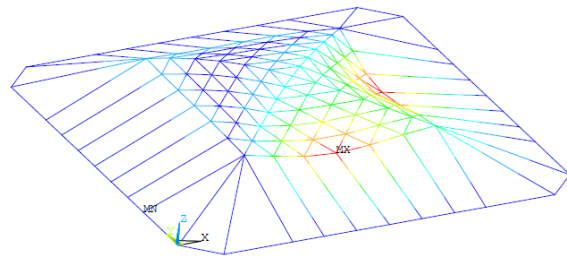
다. 이는 국부적 비대칭 작용하중의 메커니즘이 좌굴하중 감소에 영향을 미치는 것으로 파악될 수 있다.

〈Table 2〉 Buckling load of perfect model

Load Combination	Buckling Load(kN)	Disp. (mm)	Design Load (kN)	Max. My (kNm)
gLCB1	93.1	100.1	23.3	2.99
gLCB2	186.2	178.2	24.0	3.82
gLCB3	132.4	168.3	23.3	2.86
gLCB4	73.1	105.8	21.8	5.94
gLCB5	75.1	103.4	22.2	4.72



〈Fig. 7〉 Deformation shape in buckling status(gLCB1)



〈Fig. 8〉 Deformation shape in buckling status(gLCB5)

#### 4.2 초기형상불완전을 고려한 해석 결과

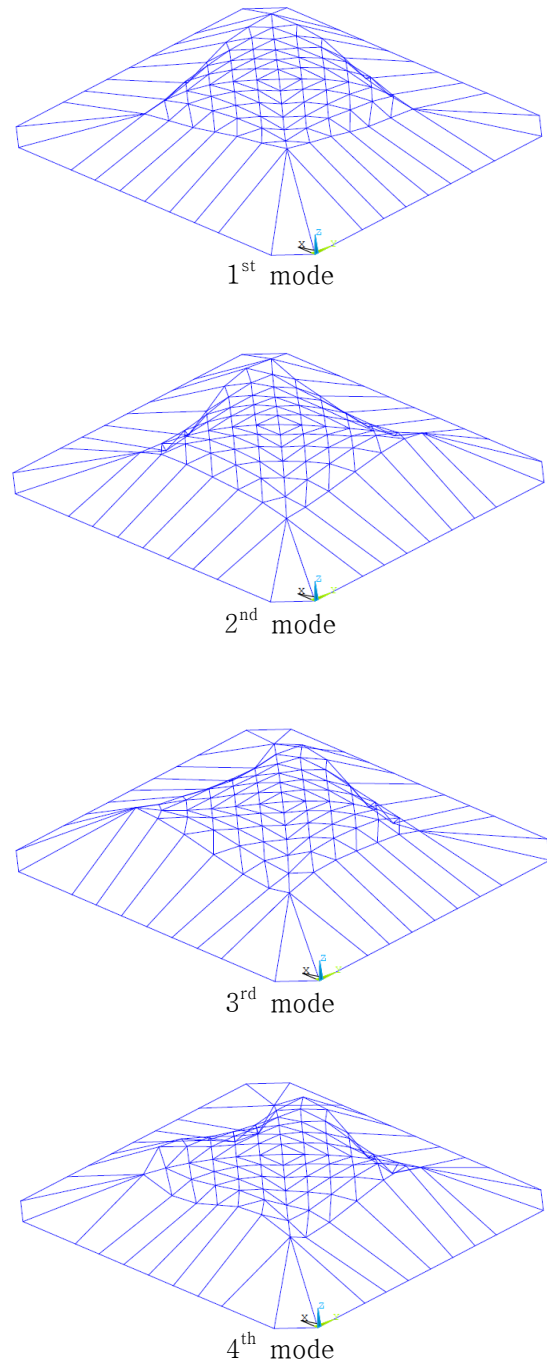
초기형상불완전(Geometrical initial imperfection)을 고려하기 위하여 <Fig. 9>에서 보는바와 같이 골조의 자중만을 고려한 고유치해석을 수행하여 전체 4개의 고유좌굴모드를 구하였다. 저차원 모드인 1,2차 모드에서는 전체좌굴의 양상을 나타내고 있으며 3차원 모드에서 4차원모드로 진행될수록 국부적인 좌굴양상을 보이고 있다. 효과적인 뿔좌굴 혹은 분

기좌굴의 양상을 관찰하기 위해서 초기형상의 불완전의 양을 정하는 것과 적절한 좌굴의 모드를 정하는 것은 설계자의 의도에 따라 다소 달라질 수 있으나, 본 논문에서는 국부적 좌굴의 양상이 나타내는 4차모드를 선정하고 기존의 참고문헌을 통하여 최대 스패의 0.01%를 초기형상의 불완전 양으로 적용하였다.<sup>[3]</sup> <Fig. 10>은 초기형상불완전의 모델에서 비대칭 적설하중을 고려하여 기하학적 비선형해석을 수행한 하중요소와 z 방향의 변위의 관계 그래프를 나타내고 있다. 하중조합 gLCB1의 경우 하중요소 4에서 1차적인 좌굴을 나타내다가 다시 좌굴하중이 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이는 초기형상의 불완전성으로 인해서 부재가 쉽게 모멘트의 지배를 받고 변위가 발생되다가 일정한 지점에 도달해서 인장을 받는 이른바 Tension stiffening 현상이 나타나기 때문이다. gLCB3의 경우도 이와 비슷한 현상이 나타나는데 비대칭 적설하중의 증분이 일어나는 부분에서 좌굴이 발생하는 동안 하중이 증분이 되지 않는 부분에서는 좌굴이 발생되지 않으며 이로 인해 Tension stiffening 현상이 발생하는 것으로 보인다. <Table 3>에서 완전형상과 초기형상불완전 모델에서의 좌굴하중에 대한 비교를 나타내고 있다.

최대 Load factor를 관찰하기 위해서 gLCB1과 3의 경우 Tension stiffening이 발생하기 전까지 임계상태로 보며 비록 하중의 상태는 증가하나 이미 좌굴이 발생했다고 가정한다. 따라서 gLCB1,2의 경우 초기형상불완전의 경우가 완전형상보다 약 50% 낮은 좌굴하중을 나타내고 있으며 전체적으로 초기형상불완전 형상을 고려했을 경우 좌굴하중이 급격하게 낮아지는 것을 알 수 있다.

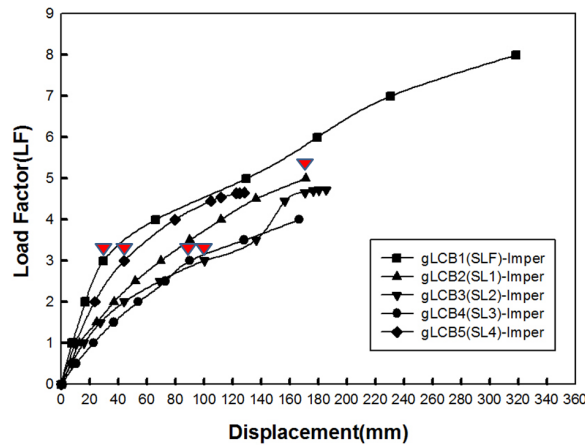
<Table 3> Maximum load factor

Load Combination	Load Factor (Perfect)	Load Factor (Imperfect)
gLCB1	6	3
gLCB2	10	5
gLCB3	7	3
gLCB4	4	3
gLCB5	4	3



<Fig. 9> Eigen buckling modes





(Fig. 10) LF-Displacement curves with asymmetric snow load(imperfect model)

## 5. 결 론

실제 완공된 단층 래티스 지붕구조물을 대상으로 기하학적 비선형 해석을 수행하여 비대칭 적설하중이 지붕의 좌굴하중에 미치는 영향을 분석하였으며 본 논문에서 정리되는 결과는 다음과 같다.

1. 지붕 구조물에 비대칭적 혹은 국부적으로 적설하중이 증분 될 경우 작용하중의 불균형적인 메커니즘으로 인해 지붕 부재의 전체적인 좌굴하중이 낮아지게 된다.
2. 완전형상의 경우 비대칭적 적설하중의 면적이 클수록 전체좌굴하중이 일반적으로 낮게 나타나지만 일률적으로 동일하게 낮아지는 것은 아니며 비대칭적 적설하중의 증분보다 오히려 높은 좌굴하중을 나타내는 경우가 발생할 수 있으므로 실제적인 좌굴하중을 찾아내기 위해서는 설계자가 상황과 조건에 맞게 비대칭적 적설하중의 패턴을 고려해야 할 것으로 보인다.
3. 초기형상불완전성 상태에서 비대칭적인 적설하중이 증분 될 경우 좌굴하중은 급격하게 낮아진다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시건축연구사업의 연구비지원(15AUDP-B100343-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Bulenda Th and Knippers J(2001), Stability of grid shells, Computers and Structures, Vol 79, 1161-1174
2. Kato S, Yamashita T, Nakazawa S, Kim Y and Fujibayashi A(2007), Analysis based evaluation for buckling loads of two-way elliptic paraboloidal single layer lattice domes, Journal of Constructional Steel Research, Vol 63, 1219-1227
3. Hwang KJ and Knippers J(2010), Stability of single layered grid shells with various connectors, Proceeding of the ICSA 2010 Guimaraes, Portugal, 581-588
4. Steinboeck A, Jia X, Hoefinger G and Mang HA(2008), Conditions for symmetric, antisymmetric, and zero-stiffness bifurcation in view of imperfection sensitivity and insensitivity, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol 197, 3623-2626
5. Shon SD, Kin SD, Lee SJ and Kim JS (2011.3) A study on the critical point and bifurcation according to load mode of dome-typed space frame structures, Journal of Korean Association for Spatial Structures, 11(1) 121-130
6. Lee SJ and Shon SD (2012.6) Characteristics of buckling load and bifurcation in accordance with rise-span ratio of space truss considering initial imperfection, Journal of Koran Society of Steel Construction, 24(3)

337-348

7. Shon SD and Lee SJ (2013.3) Critical load and effective buckling length factor of dome-typed space frame accordance with variation of member rigidity, Journal of Korean Association for Spatial Structures, 13(1) 87-96
  8. Steinboeck A, Jia X, Hoefinger G and Mang HA(2008), Conditions for symmetric, antisymmetric, and zero-stiffness bifurcation in view of imperfection sensitivity and insensitivity, Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 197, 3623-2626
  9. Shon SD, Lee SJ and Choi JH(2012), Optimum structural design of space truss with considering in snap-through buckling, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 12(2), 89-98
  10. Shon SD, Hwang KJ and Lee SJ(2014), Numerical evolution of buckling behavior in space structures considering geometrical parameters with joint rigidity, Journal of Central South University, Vol. 21(3), 1115-1124
- Received : August 21, 2015
  - Revised : September 03, 2015
  - Accepted : September 05, 2015