

목재를 이용한 육각형 공간 트러스 모델의 정적좌굴하중 특성

Characteristics of Static Buckling Load of the Hexagonal Spatial Truss Models using Timber

하 현 주**
Ha, Hyeonju

손 수 덕*
Shon, Sudeok

이 승 재***
Lee, Seungjae

Abstract

In this paper, the instability of the domed spatial truss structure using wood and the characteristics of the buckling critical load were studied. Hexagonal space truss was adopted as the model to be analyzed, and two boundary conditions were considered. In the first case, the deformation of the inclined member is only considered, and in the second case, the deformation of the horizontal member is also considered. The materials of the model adopted in this paper are steel and timbers, and the considered timbers are spruce, pine, and larch. Here, the inelastic properties of the material are not considered. The instability of the target structure was observed through non-linear incremental analysis, and the buckling critical load was calculated through the singularities and eigenvalues of the tangential stiffness matrix at each incremental step. From the analysis results, in the example of the boundary condition considering only the inclined member, the critical buckling load was lower when using timber than when using steel, and the critical buckling load was determined according to the modulus of elasticity of timber. In the case of boundary conditions considering the effect of the horizontal member, using a mixture of steel and timber case had a lower buckling critical load than the steel case. But, the result showed that it was more effective in structural stability than only timber was used.

Keywords : Hexagonal spatial truss, Rise-span ratio, Timber element, Hybrid structure, Critical point, Buckling load level, Snap-through, Nonlinear analysis.

1. 서론

최근 건축 자재에서 발생하는 유해 물질로 인한 환경오염의 사회적 문제에 대한 관심도가 높아지고 있다. 특히 건설 폐기물은 폐기물 종류별 하루 발생량의 40% 이상의 높은 비중을 차지하고 있다. 이에 친환경적인 소재를 활용한 건축물에 관한 관심이 높아지고 있다. 코르크, 에코스톤, 토루 등 다양한 친환경 건축 재료들이 있지만, 목재는 인류가 최초로 썼던 자연에서 얻을 수 있는 건축 자재로

건축 역사에서 가장 오래된 것이다. 또한 목재는 건설 폐기물을 많이 발생시키는 다른 자재와는 달리 재활용률이 91%에 이르는 친환경적인 자재이다. 이것은 철이나 콘크리트 등의 자재와는 달리 탄소를 저장해 이산화탄소의 배출량을 감축시킨다.^{1),2)}

과거의 기둥과 보에서 시작해 목조를 이용한 아치, 돔에 이르기까지 목재는 많은 건축물의 자재로 이용되었다. 목재를 이용한 건축물은 많이 있지만, 이 중에서 기술적으로 가장 발전된 구조물 중의 하나가 돔이다. 과거에는 다양한 목조 돔(wooden dome)이 존재했지만, 화재에 의한 전소로 현대에 들어서 많은 목조 돔이 그 취를 감추었다. 하지만 기술력의 발달로 내화성을 높일 수 있는 기술이 개발됨에 따라 다시 목재를 이용한 건축물과 목조 돔에 대한 관심이 증가하고 있다.

중고층 파빌리온에 관한 관심은 2009년 영국에 위치한 세계 최초 목재로 만든 아파트 슈타트하우스

* 학생회원, 한국기술교육대학교 건축공학과, 박사과정
Dept. of Architectural Eng., Koreatech University

** 교신저자, 한국기술교육대학교 건축공학과 대우교수,
공학박사

Dept. of Architectural Eng., Koreatech University
Tel: 041-560-1339, Fax: 041-560-1224
E-mail : sdshon@koreatech.ac.kr

*** 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과, 교수
Dept. of Architectural Eng., Koreatech University

(Stadthaus)이다.³⁾ 2016년 캐나다 밴쿠버의 캐나다 밴쿠버의 브리티시 컬럼비아대의 53미터의 목조 기숙사가 그 시작을 알렸다. 이후 2019년 노르웨이 오슬로에 위치한 높이 85.4미터의 미에스토르네(Mjøstårnet)⁴⁾가 있다. 국내에도 이러한 관심은 다양한 목조 건축물의 시도로 이어지고 있으며, 경상북도 영주에 있는 높이 19.12미터의 영주 국립산림과학원 목조관이 2018년도에 시공되었다.⁵⁾ 이러한 직선적인 목조건물에서 더 나아가 스페인의 메트로폴 파라솔(Metropol parasol, spain)이나 호주 번질 플레이스(Bunjil place, Australia)의 목조 그리드 셸(grid shell)과 같은 곡선을 가진 아름다운 목조 구조물들로 많은 주목을 받고 있다.

목조 돔의 역사는 1826년대의 건축가 스타소브(V. Stasov)가 설계한 러시아의 트리티니-이즈마일로프스키(Trinity-Izmailovsky) 대성당 돔으로 생각할 수 있다. 현재 이 돔은 화재로 전소지만 목조 교회의 특징을 보존한 구조물이다. 과거 돔의 건설을 위해서는 돌, 점토, 나무가 주로 이용되었고, 초창기에는 돔의 건설을 위해 목재가 비계로 사용되어 얇은 석조 돔이 건설되었다. 이러한 목조비계가 점차 독립적인 목조 돔으로 발전하였고, 이후 중동과 유럽에서도 이러한 형태의 돔이 발견되었다. 하지만 당시 강재를 사용한 구조물의 관심도가 높아 목조 돔의 관심은 오래 지속되지 못하였다.⁶⁾

최근 들어 환경문제와 더불어 다양한 건축 자재로 아치, 셸, 돔 등의 곡면과 평면을 가지는 구조물들의 설계가 이어지고 있다. 이러한 구조물은 그 형상이 자유롭고, 넓은 대공간을 뒀을 수 있다.⁷⁾ 특히 돔은 그 자체의 형상으로 힘을 균형 있게 저항할 수 있는 구조이며, 지오데식 돔(geodesic dome)과 같이 다양한 다각형으로 균일한 강성을 얻을 수 있다. 다른 격자 구조시스템과는 달리 형태에 대한 구조적 불안정성에 대한 문제를 설계 단계에서 해결해야만 하는 구조체임에도 불구하고, 그 아름다움과 가능성은 세기를 넘어 여전히 많은 건축가의 관심을 받는 구조형식이다.^{8),9)}

격자형 외피 구조물에서 최근 나타나기 시작하는 목조와 강재의 하이브리드 시스템은 경량이라는 이점과 더불어 친환경적인 요인으로 더욱 관심과 중요성이 주목받고 있다. 많은 연구자가 목재에 강재나 다른 재료를 도입하는 방안을 검토하고 있으며, 이들을 합성한 단일 부재의 연구가 한 예이다.^{10),11)} 다른 한 예로 철골과 목

재를 복합적으로 사용한 프랑스 파리 외곽에 있는 아쿠아라곤(Aqualagon) 워터파크이다.¹²⁾ 특히 중앙 코어(Central core)는 격자형 자유곡면 구조체이며, 목재와 강재가 혼합되어 아름다운 곡면을 형성하고 있다. 이 모델은 목조 부재가 수직으로 배치되어 있으며, 구조적인 안정성의 검토가 설계단계에서 고려된다.

본 연구에서는 이처럼 목재를 이용한 돔 구조물에서 나타나는 불안정 특성과 임계좌굴하중이 어떠한지를 다루고자 한다. 대상 돔의 형상은 삼각형 유닛으로 구성된 육각형(hexagonal) 공간 트러스 모델을 채택하도록 한다. 불안정 현상의 경우 자유도가 많을수록 연성(coupling) 작용으로 복잡한 결과를 얻을 수 있으므로, 명확한 관찰을 위해 본 논문에서는 한 개의 자유 절점 모델에 대해서 다루도록 한다. 또한 라이즈-스팬 비(rise-span ratio)와 경계조건을 이용하여 목재의 물성치^{14)~16)}의 변화에 따른 불안정 현상과 좌굴하중의 특성을 살펴보고자 한다. 목재의 경우 접합부와 재료적 특성에서 나타나는 이방성과 수축의 중요한 파라미터가 분석될 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 목재와 강재의 혼용과 이에 대한 안정성 문제를 다루도록 하며, 접합부 강성의 연구나 재료적 이방성의 문제는 고려하지 않도록 한다. 논문의 구성은 2장에서 불안정 임계의 판별, 3장에서 모델의 구성, 4장에서 좌굴하중의 분석을 다루도록 하며, 5장에서 해석 결과를 통해 결론을 도출한다.

2. 구조물의 불안정 임계점

아치나 돔과 같은 구조물의 불안정 현상은 뒹-좌굴(snap-through), 분기좌굴(bifurcation) 그리고 굴복(flattening) 현상으로 설명된다. 일반적으로 단순한 모델은 극한점(limite point)에서 구조물의 강성을 기대할 수 없고, 작은 외력에서도 급격한 변위를 동반하게 된다. 이 상태는 구조물 전체의 불안정(overall unstable)한 상태가 된다. 그러나 좀 더 복잡한 모델에서는 극한점 이전에 새로운 변형양식이 나타날 수도 있으며, 평형 경로상에서 분기가 일어난다. 주로 이것은 비대칭성에 의해 나타나는 현상으로서 국부적인 영향이 전체 구조물이 불안정한 현상으로 이어지기도 한다. 이러한 다양한 동적, 정적인 불안정한 현상들에 대해서 그 임계점을 구하고 붕괴 메커니즘을 예측하기는 쉽지 않다.^{8),9),13)}

탄성영역에서 불안정 현상이 나타나는 돔형 공간구조물은 일반적으로 비선형 해석을 통해서 임계경계를 판단한다. 이 과정에서 접선 강성행렬은 증분 구간의 불안정 특성에 대한 정보를 알 수 있다. 비선형 평형 경로 (equilibrium path)의 각 증분 구간을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K\dot{d} + f\dot{\lambda} = 0 \quad (1)$$

여기서, 접선강성행렬 K 는 보존계에서는 대칭행렬이고, 직교변환행렬이 존재하는 대각화가능행렬이다. 강성행렬 K 를 이용하면 구조물의 안정성에 대한 정보를 행렬식과 최소 고유치 c_1 를 통해서 얻을 수 있다. 즉, 특이점인 $\det(K) = 0$ 에서는 $c_1 = 0$ 이 되므로 다음의 관계가 성립한다.⁸⁾

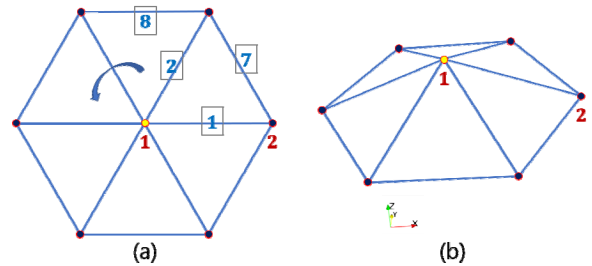
$$g_1\dot{\lambda} = 0 \quad (2)$$

여기서, $g_1 = t_1 \cdot f$ 이며, c_1 에 대응하는 고유행렬 t_1 과 f 의 내적이다. 위 식을 만족하는 경우는 $\dot{\lambda} = 0$ 이거나 $g_1 = 0$ 일 경우이다. 전자의 경우는 임계점(critical point)이 극한점에 해당하며, 뒹-좌굴 현상이 발생한다. 그러나 후자의 경우는 t_1 과 f 가 서로 직교하는 것을 의미하며, 분기점에 해당된다. 이때, $\dot{\lambda} = 0$ 의 경우는 대칭 분기점, $\dot{\lambda} \neq 0$ 의 경우는 비대칭 분기점으로 분류할 수 있다. 따라서, 이와 같은 해석과정을 통해 불안정 임계점을 판별하여 설계에 반영할 수 있다.

3. 해석 모델의 형상과 입력자료

해석 모델은 삼각형 유닛을 기본으로 하는 육각형 공간 트러스이다. 형상은 <Fig. 1>에서 보는 바와 같고, 중앙부의 1번 절점을 기준으로 같은 거리에 경계 절점이 2~7번까지 배치되어 있다. 부재는 절점 1과 연결된 6개의 부재와 경계부로 둘러싸는 6개의 부재로 구성된다. 해석 대상 모델의 형상에 대해서는 파라미터 μ 에 따라 나뉘며, <Table 1>과 같이 세 가지 경우를 고려하였다. 각각의 경우에 대한 형상의 치수는 표에 나타난 바와 같고, 경사 부재의 길이는 형상 파라미터에 따라 다르지만,

수평 부재는 같다.



<Fig. 1> Shape of a hexagonal spatial truss model; (a) floor view, (b) perspective view

<Table 1> Shape parameters and element length of the hexagonal dome model

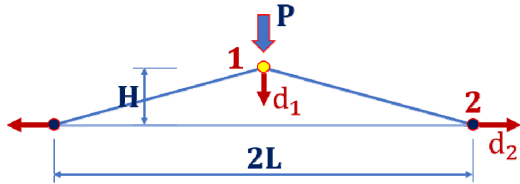
$\mu = \frac{H}{2L}$	L (m)	H (m)	Member length	
			1~6	7~12
0.1	5.0	1.0	5.099	5.0
0.2	5.0	2.0	5.385	5.0
0.3	5.0	3.0	5.831	5.0

해석 대상 모델은 돔형 공간 트러스의 불안정에 대한 영향을 다루는 문제이므로 하중은 <Fig. 2>에서 보는 바와 같이 중앙부 1번 절점에 중력 방향으로 작용한다. 경계조건은 가장자리 절점 6개에 두 가지 경우로 나누어 적용하도록 하며, 다음과 같이 Case 1과 2로 정의한다.

- Case 1 : 1번 절점의 자유도를 제외한 나머지 경계 절점의 자유도는 모두 고정된 경우
- Case 2 : 1번 절점의 하중 방향 자유도와 경계 절점의 하중 직각 방향 자유도를 제외한 나머지 절점의 자유도가 고정된 경우

Case 1의 경우는 수평 방향 부재의 영향이 무시된 경우이고, Case 2의 경우는 경사 부재와 수평 방향 부재의 영향이 모두 고려된 경우의 예제에 해당한다. Case 1의 경우는 <Fig. 2>에서 볼 수 있는 1번 절점의 수직 변위 (d_1)만 발생하고, Case 2의 경우는 d_1 과 2번 절점 수평 변위(d_2)가 모두 발생하는 경우이다. 두 경우로 나누어 다루는 이유는 경사 방향 부재와 수평 방향 부재의 영향에 대해서 알아보기 위한 것이다. 따라서, Case 1의 경우는 경사 부재가 어떤 재료로 구성되는가에 따라 나타나는 좌굴하중을 알아보는 것이고, Case 2는 경사 부재

와 수평 부재의 재료가 다를 때 나타나는 임계하중을 알아보기 위한 것이다.



〈Fig. 2〉 Shape parameters and observed nodal dofs of the model

본 논문에서는 Case 1의 경우는 강재나 목재로 구성된 경우를 다루고, Case 2는 강재 또는 목재로 구성된 경우와 강재와 목재를 복합하여 부재를 구성한 경우를 다루도록 한다.

해석 대상 모델에 사용할 목재의 종류는 각각 스프러스(Spruce: 가문비나무), 소나무(Pine), 낙엽송(Larch)이다.^{14)~16)} 각 목재에 대한 물성치(material property)는 〈Table 2〉에서 보는 바와 같고, 강재도 함께 나타내었다. 표에서 나타난 ρ , E , ν 는 각각 밀도(density), 탄성계수(Young's modulus) 그리고 포와송비(Poisson's ratio)이다.

〈Table 2〉 Material properties^{14)~16)}

Material	ρ (Density) (kg/m ³)	E (Elasticity) (GPa)	ν (poisson's ratio)
Steel	7860	205.0	0.3
Spruce	507.5	15.770	0.3742
Pine	487.4	9.302	0.3742
Larch	576.9	13.480	0.3742

부재의 단면적은 강재의 경우 원형 강관에 대한 값을 이용하였으며, 목재의 경우는 강재와 직경이 같은 원형 단면적으로 가정하였다. 채택한 값은 강재의 경우 직경 216.3mm와 두께 4.5mm의 강관으로 단면적이 29.94 cm²이며, 목재의 경우는 단면적이 367.45cm²이다. 목재의 경우 강재와 같이 강관의 형태로는 잘 생산하지 않으므로 같은 지름을 가진 부재를 적용한 것이다.

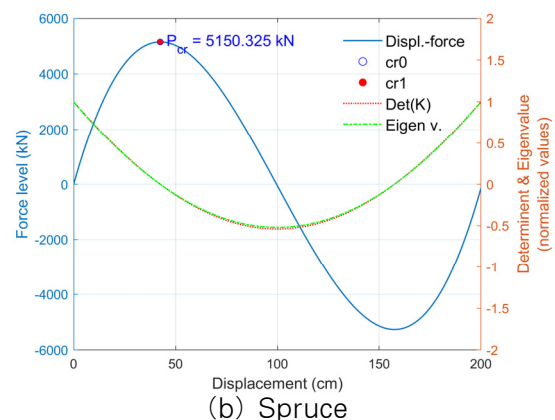
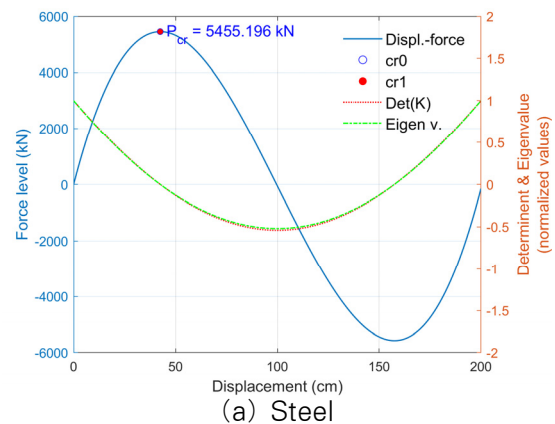
이 같은 이상의 초기 입력자료를 바탕으로 비선형 증

분 해석을 수행하도록 하며, 각각의 증분 구간에서 나타나는 특성을 통해서 불안정 현상과 좌굴하중은 다음 장에서 다루도록 한다.

4. 평형 경로와 좌굴하중 특성

4.1 Case 1의 불안정 현상과 임계

경사 부재의 영향만을 살펴본 Case 1의 평형 경로는 〈Fig. 3〉에서 보는 바와 같다. 부재가 강재인 〈Fig. 4(a)〉와 목재인 〈Fig. 4(b)〉는 불안정 현상이 극한 임계점이 나타나는 뒹 좌굴이며, 육각형 모델에서는 이 현상만이 발생한다. 그러나 두 경우의 임계 레벨 P_{cr} 은 강재가 높다. 이는 단면적이 작아도 재료 탄성계수가 월등히 크기 때문이다.



〈Fig. 3〉 Equilibrium path (Case 1, $\mu=0.1$)

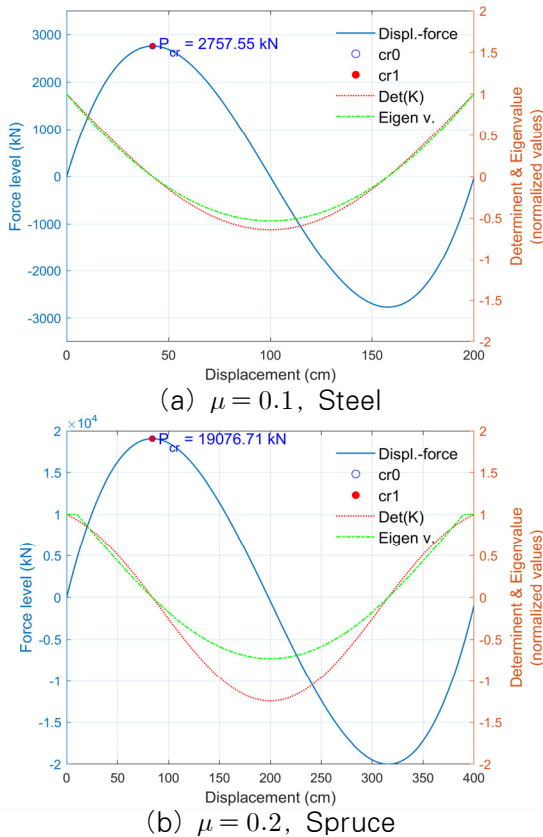
〈Table 3〉 Buckling load P_{cr} of Case 1

Material	μ		
	0.1	0.2	0.3
Steel	5.455	38.826	110.371
Spruce	5.150	36.656	104.203
Pine	3.038	21.622	61.464
Larch	4.402	31.333	89.071

Case 1의 P_{cr} 을 목재의 종류에 따라서 구한 결과를 〈Table 3〉에 나타내었다. 표에서 볼 때, 목재의 경우 같은 단면적에서 재료의 탄성계수에 따라 P_{cr} 이 결정되며, 형상 파라미터 μ 의 변화에도 동일한 결과를 얻는다.

4.2 Case 2의 불안정 현상과 임계

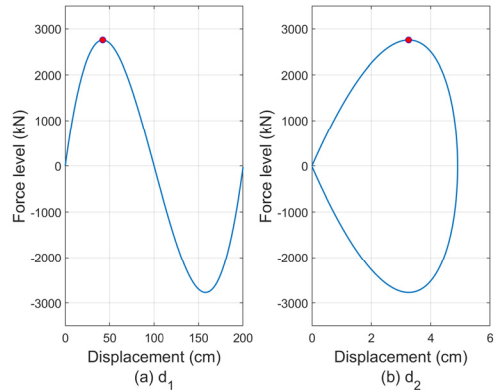
수평 부재의 영향도 함께 고려한 Case 2의 평형 경로는 〈Fig. 4〉와 같다. $\mu = 0.1$ 인 강재의 결과 (a)와 $\mu = 0.2$ 인 목재의 결과 (b)는 Case 1과 같이 뒹 좌굴이 발생한다.



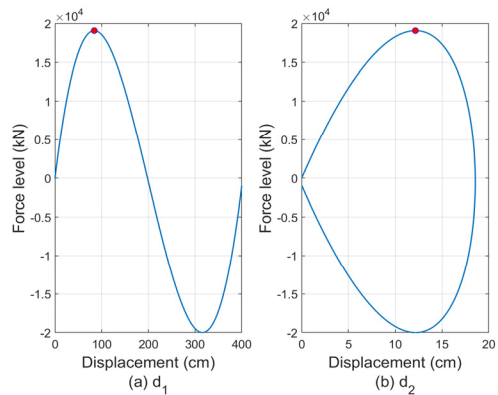
〈Fig. 4〉 Equilibrium path of Case 2

두 결과에서 μ 에 따라 고유치의 변화는 다르지만, 특이점의 발생 위치는 유사하다. 임계 레벨의 위치는 그러나 두 경우의 임계 레벨 P_{cr} 은 강재가 높다. 이것은 비록 단면적이 작아도 재료 탄성계수가 월등히 크기 때문이다.

Case 2의 경우는 〈Fig. 2〉에 나타난 변위 d_2 의 움직임도 관찰할 수 있다. 〈Fig. 5〉는 $\mu = 0.1$ 의 형상에서 모든 부재가 강재인 모델의 두 자유도에 대한 평형 경로이다. 그림 에서 보는 바와 같이 (a)는 d_1 의 경로를 보여주고 있고, (b)는 d_2 의 경로를 나타내었다. 예상한 바와 같이 수평 방향의 변위가 발생하며, 극한이 특이점인 것을 알 수 있다. 〈Fig. 6〉도 마찬가지이며, $\mu = 0.2$ 의 모든 부재가 스프러스인 모델이다. 두 모델 모두 예상된 결과를 보인다. 두 모델은 모두 뒹 좌굴이 경사 부재와 수평 부재 모두에서 영향을 받아 발생하며, d_2 의 경우 극한점을 지나서 원래의 자리로 돌아온다.

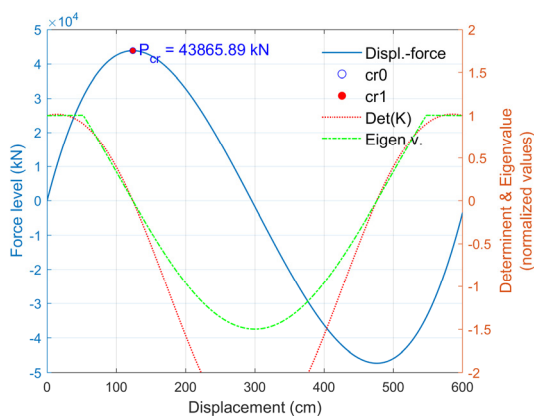


〈Fig. 5〉 Equilibrium path of Case 2 ($\mu = 0.10.1$, Steel, dof: d_1 and d_2)



〈Fig. 6〉 Equilibrium path of Case 2 ($\mu = 0.2$, Spruce, dof: d_1 and d_2)

경사 부재와 수평 부재가 다른 재료로 구성된 경우의 해석 결과를 (Fig. 7)에 나타내었다. 이 모델의 경우, 경사 부재는 강재를 사용하였고, 수평 부재는 목재를 사용한 것이다. 목재의 종류는 소나무의 물성치를 적용하였다. 해석 결과 그림에서 볼 때, 다른 예제와 유사한 뒹좌굴 메커니즘을 가지고 있으며, 임계점의 발생도 임계레벨을 제외하고 모두 비슷하다. 즉, 강성의 변화와 형상의 변화가 있으므로 특이점과 고유치의 값의 차이는 있을 수 있으나 양상은 같게 나타난다.



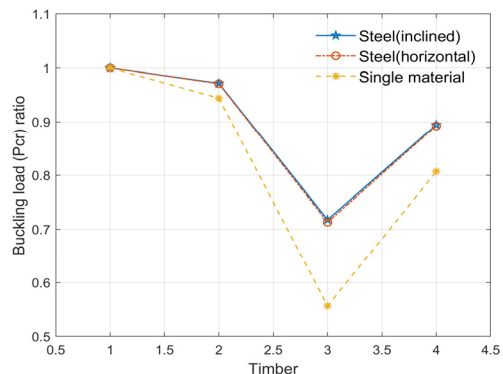
(Fig. 7) Equilibrium path of Case 2 ($\mu=0.3$, Steel(inclined) & Pine(horizontal))

이상의 결과에서 형상과 재료에 따라 좌굴하중 P_{cr} 의 값은 차이가 나며, 여기서 다루어진 결과는 탄성영역에 관한 결과이다. 이러한 변화는 Case 1에서 살펴보았지만, 경사 부재와 수평 부재의 재료가 다를 경우에 대해서 좌굴하중을 살펴볼 필요가 있다.

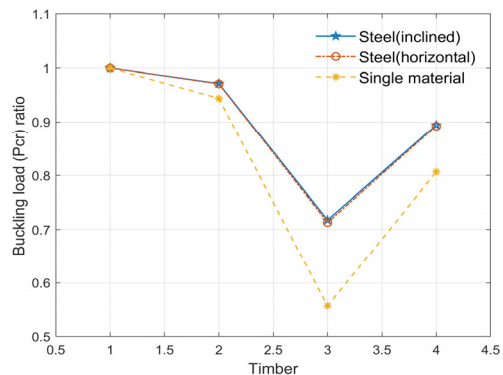
(Table 4)는 Case 2의 $\mu = 0.1$ 형상에 대한 좌굴하중을 계산한 결과이다. 테이블에 나타난 바와 같이 모든 부재를 강재를 이용할 경우가 가장 높고, 목재를 이용할 경우, 목재의 강성에 따라서 P_{cr} 이 결정되었다. Case 1과 같은 조건의 모델보다 낮은 P_{cr} 로 나타나지만, 임계하중의 변화는 유사하다. 이것은 (Table 4)의 대각선 방향의 P_{cr} 변화를 통해서 알 수 있다. 여기서 대각선 방향의 변화는 부재를 모두 같은 재료를 사용한 것에 따른 결과이며, 경사 부재와 수평 부재가 다른 재료일 경우를 살펴볼 필요가 있다.

(Table 4) Buckling load P_{cr} of Case 2 ($\mu = 0.1, \times 10^3 \text{ kN}$)

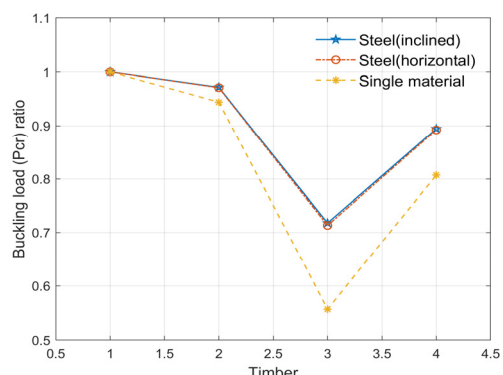
horiz. inclin.	Steel (No. 1)	Spruce (No. 2)	Pine (No. 3)	Larch (No. 4)
Steel	2.758	2.679	1.979	2.466
Spruce	2.677	2.603	1.937	2.402
Pine	1.967	1.926	1.536	1.814
Larch	2.460	2.398	1.821	2.225



(a) $\mu = 0.1$ ($P_{cr}^s = 2.757 \times 10^3 \text{ kN}$)



(b) $\mu = 0.2$ ($P_{cr}^s = 20.206 \times 10^3 \text{ kN}$)



(c) $\mu = 0.3$ ($P_{cr}^s = 59.861 \times 10^3 \text{ kN}$)

(Fig. 8) Buckling load ratio of Case 2

각각의 형상 파라미터에 대한 강재 모델에서 계산된 임계하중을 P_{cr}^s 라 할 때, 목재를 경사 부재와 수평 부

재에 다르게 배치한 모델의 좌굴하중의 비를 <Fig. 8>에 나타내었다. 여기서 X-축 목재의 번호는 <Table 4>에 나타난 바와 같다. 이 그림의 결과에서 목재의 탄성계수가 낮은 모델이 가장 낮게 나타났다.

단면적이 작아도 강재만을 사용한 결과가 가장 높은 좌굴하중을 가진다. 그러나 목재만을 사용한 것보다는 강재와 목재를 혼용하면 안정성이 더 크고, 그 영향은 목재 특성마다 차이가 있다. 각각의 비율은 <Fig. 9>와 같고, μ 에 대한 좌굴하중 비의 결과도 유사하게 나타난다. 가장 높은 모델은 강재(No. 1)이며, 가장 낮은 모델은 소나무(No. 3)만을 사용한 모델이다. 다음으로 큰 값은 강재와 스프러스(No. 2)를 혼용한 모델이며, 이 양상은 형상 파라 미터에는 큰 영향이 없다. 또한 경사 부재와 수평 부재에 대한 목재의 배치에 대한 영향은 크게 나타나지 않는다. 이것은 단일-자유도 모델에 대한 특성으로 생각된다.

5. 결론

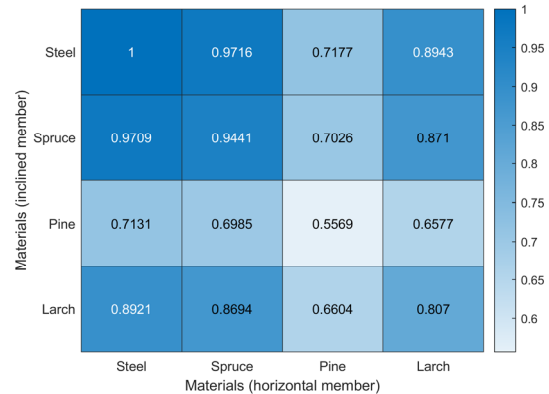
본 논문에서는 목재를 활용한 육각형 돔 모델의 좌굴하중에 관해서 연구하였다. 목조 하이브리드 돔의 기초적인 연구로서 지오데릭 돔의 가장 최소단위를 다룬 것이다. 경사 부재와 수평 부재의 영향을 살펴볼 수 있도록 두 가지 모델을 채택하였고, 탄성영역만 다루었다. 또, 증분 해석과 단계별 특이점을 관찰하여 좌굴하중을 구하였다.

경사 부재의 변형만을 고려한 모델에서는 좌굴하중이 축강성에 따라 결정되며, 탄성계수가 높은 목재의 좌굴하중이 가장 높다. 수평 부재의 변형을 함께 고려한 경우는 강재와 목재의 복합된 모델에 대한 안정성은 비록 강재만을 사용한 경우보다 낮지만, 목재만을 사용한 경우보다 높다. 또한, 단일 자유도 모델에서는 경사 부재와 수평 부재의 영향이 유사하게 나타난다.

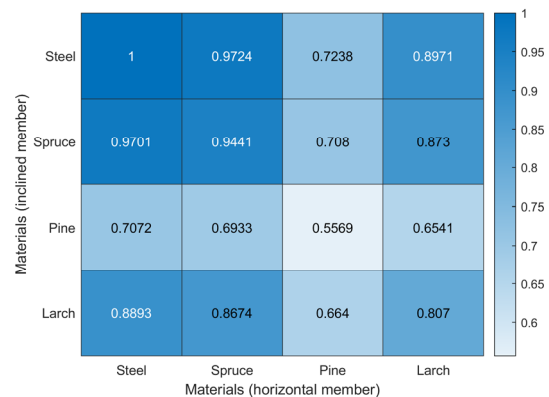
목재의 경우 접합부의 특성과 재료적 이방성 및 수축에 대한 고려에서 안정성의 평가가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

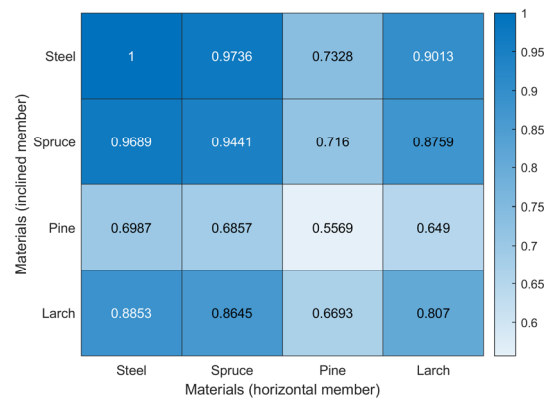
이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원



(a) $\mu=0.1$ ($P_{cr}^0 = 2.757 \times 10^3$ kN)



(b) $\mu=0.2$ ($P_{cr}^0 = 20.206 \times 10^3$ kN)



(c) $\mu=0.3$ ($P_{cr}^0 = 59.861 \times 10^3$ kN)

<Fig. 9> Buckling load ratio of Case 2 in terms of rise-span ratio μ

으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2019R1A2C2010693).

References

1. Kwak, E. S., Shon, S. D., & Lee, S. J., "A Study of Modular Dome Structural Modeling with Highly Filled Extrusion Wood-Plastic,"

- Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.19, No.2, pp.076-083, 2015, doi: 10.11112 /jksmi.2015.19.2.076
2. National Institute of Forest Science (Korea), "Eco-friendly material, Wook," Sep. 2018, <http://know.nifos.go.kr/webzine/201808/bigdata.do>, 2018.
 3. Murray Grove, The original timber tower, waughthistleton.com. Retrieved 11 May 2021, <https://waughthistleton.com/murray-grove>
 4. Abrahamsen, R., Mjøstårnet-Construction of an 81m tall timber building." Internationales Holzbau-Forum IHF, 2017.
 5. IDS, YoungJu CLT Apt, 2021, <http://idsgrape.com/1415130413>
 6. Misztal, Barbara, & MISZTAL. Wooden domes. Springer, 2018.
 7. Gutman, S., Ha, J. & Shon, S., "Estimation algorithm for physical parameters in a shallow arch," Journal of the Korean Mathematical Society, Vol.58(3), pp.723-740, 2020, doi: 10.4134/JKMS.j200226
 8. Shon, S., Kim, S., Lee, S. & Kim, J., "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, Vol. 11(1), 121-130, 2011, doi: 10.9712/KASS.2011.11.1.121
 9. Shon, S. & Lee, S., "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, Vol. 13(1), 87-96, 2013, doi: 10.9712/KASS.2013.13.1.087
 10. Jurkiewicz, B., Durif, S., Bouchair, A. & Grazide, C., "Experimental and analytical study of hybrid steel-timber beams in bending," Structures, Vol. 39, pp.1231-1248, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.052
 11. Zhang, C., Chun, Q., Wang, H., Lin, Y. & Shi, J., "Experimental study on the flexural behaviour of timber beams strengthened with high ductility and low cost hybrid fibre sheets," Construction and Building Materials, Vol. 322, 2022, 126514, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126514
 12. Weill, J. "Complex Structural Timber Design", SOFisTiK Seminar 2018, <https://sofistikforyou.com/complex-structural-timber-design/>, 2018.
 13. Shon, S. & Hwang, K., "Dynamic buckling characteristics of 3-free-nodes spatial truss model under the step load," Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol. 20(2), 59-68, 2020, doi: 10.9712/KASS.2020.20.2.59
 14. Ashby, M., Gibson, L., Wegst, U. & Olive, R., "The Mechanical Properties of Natural Materials. I. Material Property Charts," Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 450, pp.123-140, 1995, doi: 10.1098/rspa.1995.0075
 15. Ashby, M., The CES EduPack Database of Natural and Man-Made Materials, 2008, <https://www.grantadesign.com/download/pdf/biomaterials.pdf>
 16. Ansys, Materials: Granta Materials Data for Simulation, 2020, <https://www.ansys.com/products/materials/materials-data-for-simulation>
- Received : July 8, 2022
 - Revised : August 29, 2022
 - Accepted : August 29, 2022