



전개형 시저스 구조물의 동역학적 모델링 및 전개 완료 형상에 따른 강성 분석

김태현¹, 서종은², 한재홍³

Dynamic Modeling of Scissors Structure and Stiffness Analysis Based on Deployed Configuration

Tae-Hyun Kim¹, Jong-Eun Suh² and Jae-Hung Han³

Department of Aerospace Engineering, KAIST

ABSTRACT

Deployable structures are widely used for space mission because of their advantages in storage and transportation coming from its transformability of configuration. The space structures should be designed with high stiffness to withstand the various types of disturbance that they encounter during operation. Especially for the deployable structures, the internal forces loaded on the component or the stiffness at its deployed configuration should be analyzed since they usually consist of the thin and light structures. In this paper, a dynamic model of the scissors structure is established and its deployment behavior is analyzed, especially focusing on the deployment speed and the internal force on each joint. In addition, modal analysis is carried out for the 1-stage and 2-stage scissors structures in order to analyze the stiffness of the scissors structure based on its deployed configuration. The fundamental mode shapes and natural frequencies are analyzed and discussed.

초 록

전개형 구조물은 크기와 모양의 변형이 가능하여 수납과 이동이 용이한 장점으로 인해 우주 임무에 많이 사용된다. 특히, 우주에서 사용되는 구조물들의 경우에는 운용과정에서 직면하는 다양한 외란들을 견디기 위하여 높은 구조 강성을 가지도록 설계되어야 한다. 특히 전개형 구조물의 경우, 구조 경량화를 위하여 얇고 가벼운 소재를 사용하는 경우가 많기 때문에 전개 과정에서 발생하는 내력이나 전개 완료 상태에서의 구조 강성 등에 대한 면밀한 분석이 수행되어야 한다. 본 논문에서는 전개형 구조물 중에서 널리 사용되는 시저스 구조물에 대해 동역학적 모델을 수립하고 전개 속도, 각 조인트에 걸리는 내력 등 전개 거동을 분석한다. 또한, 구조물의 전개 완료 형상에 따른 구조 강성 변화를 분석하기 위하여 1단과 2단 두 가지 형상에 대해 모드 해석을 수행하였으며, 저차 모드의 모드 형상 및 고유 진동수 변화를 확인하고 변화의 원인을 고찰하였다.

Key Words : Deployable Structure(전개형 구조물), Scissors Structure(시저스 구조물), Modal Analysis(모드 해석), Natural Frequency(고유 진동수)

† Received : March 26, 2019 Revised : May 14, 2019 Accepted : May 20, 2019

¹ Graduate Student, ² Graduate Student, ³ Professor

³ Corresponding author, E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr, ORCID 0000-0001-5311-9855

I. 서 론

전개형 구조물은 크기와 모양의 변형이 가능한 구조물로서, 수납과 이동을 용이하게 하기 위해 사용된다[1,2]. 특히, 우주 관련 분야에서는 중량 대비 부피비를 크게 할 수 있다는 장점 때문에 안테나의 반사판, 태양전지판 등에 많이 활용된다[3-5]. 실제 우주 환경에서 사용되는 전개형 구조물은 궤도상에 올라가게 되면 수리 및 보수가 매우 어렵기 때문에 높은 신뢰성과 안정성이 요구된다. 또한, 운용과정에서 직면하는 다양한 형태의 외란을 견디기 위하여 높은 구조 강성을 가지도록 설계되어야 한다. 특히, 전개형 구조물은 축방향 하중이나 비틀림 하중에 비해 굽힘에 취약한 경우가 많기 때문에 일반적으로 낮은 주파수에서 굽힘 모드가 발생한다. 이러한 전개형 구조물의 굽힘 모드가 외란에 의해 발생하는 진동이나 위성의 자세 제어에 악영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 굽힘 강성에 대한 면밀한 분석이 수행되어야 한다[6].

전개형 구조물의 종류는 다음과 같이 6가지 종류로 분류할 수 있다[6]. 1) Inflatable booms, 2) Telescopic booms, 3) Shape memory composite booms, 4) Articulated booms, 5) Deployable truss structures, 6) Coilable booms. 전개형 시저스 구조물은 Deployable truss structures에 해당하는 전개형 구조물로서 구조적으로 간단하여 전개 및 수납이 쉽고 높은 신뢰성을 가지며 힌지의 위치나 부재의 길이에 따라 구조물의 형상을 원하는 대로 다양하게 바꿀 수 있다는 장점 때문에 널리 사용된다[7,8].

본 연구에서는 시저스 구조물의 모델링 및 전개 거동 해석을 통하여 전개 속도와 각 조인트에 걸리는 하중 등을 분석하고 이를 동역학 시뮬레이션 프로그램인 MSC 社의 ADAMS 결과와 비교하여 검증하였다. 또한, 구조물이 전개될 때 전개 완료 형상이 구조물의 강성에 어떤 영향을 미치는지를 확인하기 위해 1단과 2단 시저스 구조물에 대하여 모드 해석을 수행한 뒤, 저차 모드의 모드 형상 및 고유 진동수 변화를 확인하고 고유 진동수가 길이에 단순히 반비례하지 않는 원인에 대해서 고찰하였다. 또한, 보 이론을 이용하여 이론적인 저차 모드의 고유 진동수를 구하고, 이를 유한요소 해석 프로그램(ANSYS)을 통해 얻은 결과와 비교하였다.

II. 본 론

2.1 시저스 구조물의 전개 거동 해석

2.1.1 시저스 구조물의 모델링

전개형 시저스 구조물은 동일한 유닛으로 이루어진 구조물로서, Fig. 1은 전개형 시저스 구조물의 하

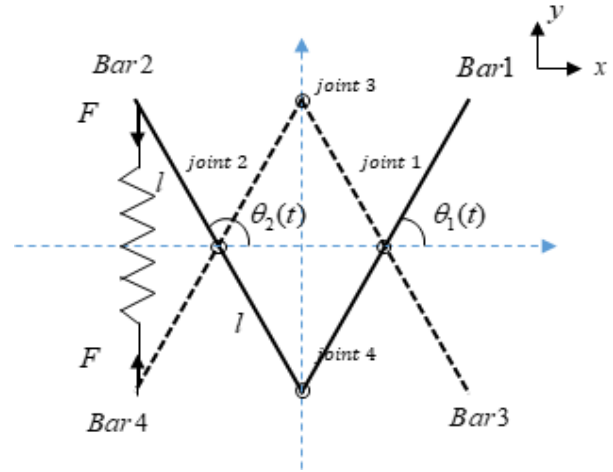


Fig. 1. A single unit of scissors structure

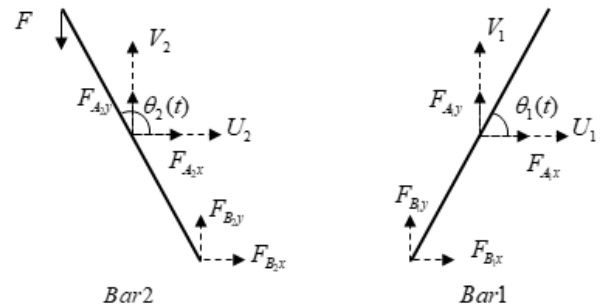


Fig. 2. Free-body diagram of bar 1 and 2

나의 유닛을 나타낸다. 하나의 유닛은 총 4개의 부재로 이루어져 있고, 각 부재는 동일한 길이($2l$)로 그림과 같이 힌지로 연결되어 있다. 전개 구동력은 탄성 복원력을 모사하기 위하여 유닛 구조의 끝단에 용수철이 부착되어 있다고 가정하였다. 이때, 전개 구동력 F 와 θ_1 및 θ_2 의 관계식을 통해 전개 속도, 각 조인트에 걸리는 하중 등 전개 거동을 분석하기 위해 각 부재를 분리하여 운동방정식을 유도하였다. 운동방정식을 도출하는 과정에서 사용된 가정은 아래와 같다.

- 1) 모든 부재는 동일한 재원을 가지는 강체이다.
- 2) 각 조인트에서의 마찰은 무시한다.

또한, 부재 1, 2와 3, 4는 완전히 대칭을 이루므로 부재 1과 2의 운동방정식에 대해서만 다룬다. Fig. 2는 부재 1과 2에 대한 자유물체도이다. $F_{Ax,y}, F_{Bx,y}$ 는 각 부재가 조인트로 인해 받는 내력, ρ 는 선형밀도 (kg/m), $U_i, V_i (i=1,2)$ 는 부재 1과 2의 x, y 방향 변위, k 는 스프링 상수를 의미한다. 부재는 알루미늄 재질로 가정하였고 수납 상태를 의미하는 θ_1 의 초기값은 85° , 최종적인 전개 상태일 때의 θ_1 은 10° 라고 가정하였다.

위와 같은 가정일 때, 힘과 모멘트의 평형식을 이

용하여 운동방정식을 세울 수 있으며, 최종적으로 아래 식 (3)과 같이 전개 구동력 F 와 θ_1 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\theta_2(t) = 180 - \theta_1(t) \tag{1}$$

$$F(t) = 2kl(\sin\theta_1(t) - \sin(10^\circ)) \tag{2}$$

$$\ddot{\theta}_1 = -\left(\frac{1}{3} + \sin^2\theta_1\right)^{-1} \left(\frac{F\cos\theta_1}{4\rho l^2} + \sin\theta_1\cos\theta_1\dot{\theta}_1^2\right) \tag{3}$$

2.1.2 시저스 구조물의 전개 거동 해석

앞에서 유도한 운동방정식을 통해 시저스 구조물의 전개 거동 해석을 수행하였다. 전개 거동을 확인하기 위한 모델은 미터급 전개가 가능한 구조를 상정하였으며, 설계변수 값들을 Table 1과 같이 선정하여 시간에 따른 전개 각도 θ_1 , 각속도 ω_1 그리고 전개 길이를 확인하였다. 또한, 모델링의 결과를 검증하기 위하여 Fig. 3과 같이 동역학 시뮬레이션 프로그램인 ADAMS를 이용하여 전개 거동 해석 결과 비교하였다.

Figure 4는 모델링을 통해 얻은 전개 거동 해석 결과와 ADAMS를 이용한 시뮬레이션 결과를 함께 나

Table 1. Material properties and dimensions of a bar

Density (kg/m^3)	2770
Elastic modulus (GPa)	71
Length (m)	0.4
Width (m)	0.02
Thickness (m)	0.01
Spring constant k (N/m)	0.3

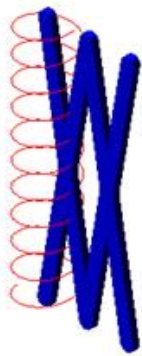


Fig. 3. ADAMS simulation view

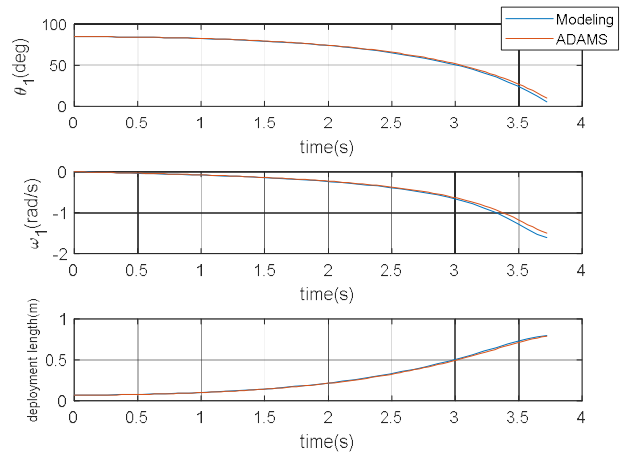


Fig. 4. Comparison of deployment behavior obtained by dynamic model and ADAMS simulation ($\theta_1, \omega_1, \text{deployment length}$)

타낸 그래프이다. 두 결과가 매우 유사하기 때문에 동역학적 모델이 시저스 구조의 실제 전개 거동을 잘 묘사할 수 있다고 판단된다. 전개가 진행됨에 따라 약간의 차이가 발생하는 원인은 시뮬레이션에 사용된 모델의 부재는 양 끝에 조인트를 위한 구멍이 있으며 끝단이 둥글기 때문에 길이 방향으로 두께와 너비가 완전히 균일하지는 않아서 생기는 것으로 판단된다. 추가적으로, Figs. 5~7과 같이 스프링 상수 k 를 바꿔가며 전개 각도 θ_1 , 각속도 ω_1 그리고 전개 길이의 변화 등 전개 거동을 확인하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, 스프링 상수 k 가 0.3, 0.2, 0.1N/m일 때 각각의 전개 완료 시간은 약 3.72, 4.56, 6.44초로, 스프링 상수 k 가 작을수록 전개 시간은 길어지지만 선형적인 반비례 관계는 아닌 것을 알 수 있다. 또한, k 가 0.3N/m인 경우의 각 조인트에 걸리는 내력을 Fig. 8에 나타내었다.

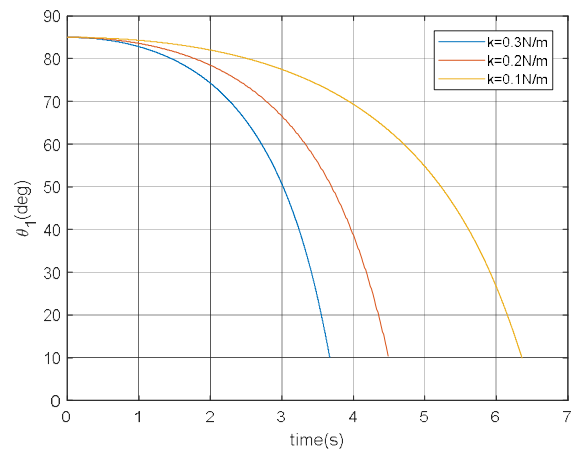


Fig. 5. Angular response θ_1 of scissors structure during deployment

이처럼, 전개형 시저스 구조물의 하나의 유닛을 모델링함으로써 전개 구동력에 따른 전개 속도 및 각 조인트에 걸리는 내력의 크기 등 전개 거동을 분석할 수 있다.

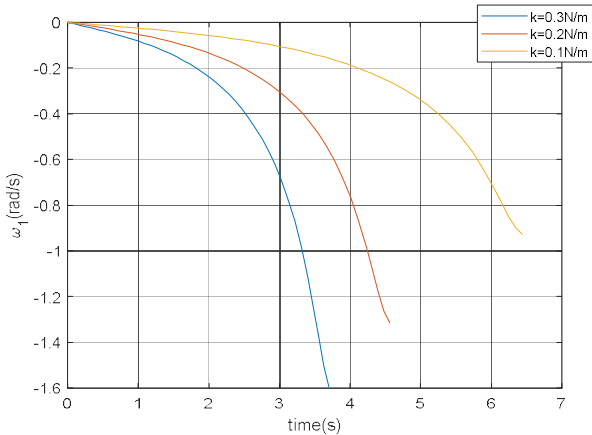


Fig. 6. Angular velocity ω_1 of scissors structure during deployment

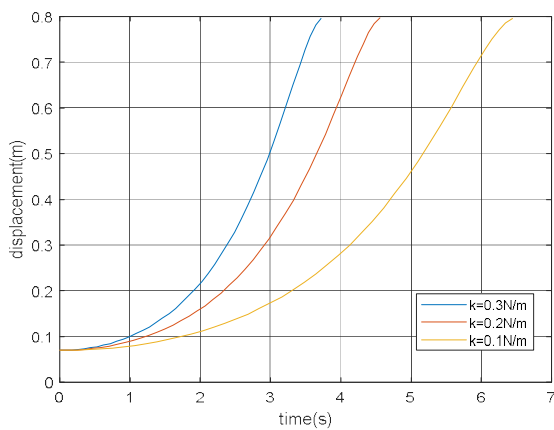


Fig. 7. Length of scissors structure during deployment

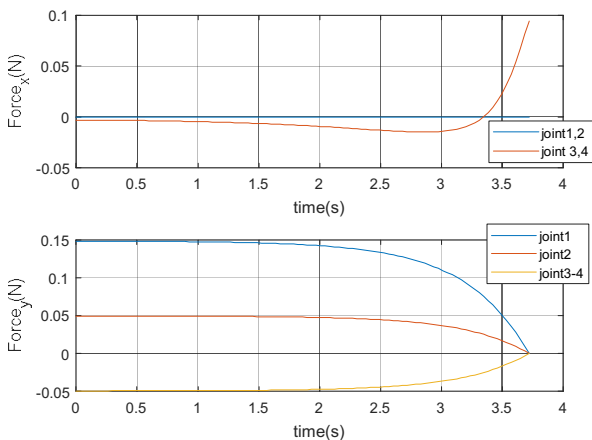


Fig. 8. Internal force of each joint in x and y direction ($k=0.3N/m$)

2.2 시저스 구조물의 모드 해석 결과

2.2.1 시저스 구조물 형상 및 해석 환경

시저스 구조물은 전개되면서 형상과 강성이 변하기 때문에 전개 완료 형상에 따른 강성 변화를 분석하기 위하여 모드 해석을 수행하였다. 이 절에서는 시저스 구조물의 모드 해석 결과를 보이기에 앞서, 어떤 방식으로 모드 해석을 수행하였는지에 대해 설명한다. 시저스 구조의 한 유닛을 Fig. 9와 같다고 하였을 때, 전개 초기 각도 $\theta(0)$ 는 85° 로 설정하였고 이때의 길이를 L_0 라 가정하였다. 전개 완료 형상은 총 11가지 경우로 나누어, 전개된 구조물의 길이를 nL_0 라고 한다면 n 이 1부터 11까지 단계적으로 전개된다고 가정하였다. 즉, $n=1$ 일 때는 전개 길이가 가장 짧은 상태인 수납 상태를 의미하고, $n=11$ 일 때는 전개 길이가 가장 길게 전개된 상태라고 설정하여 모드 해석을 수행하였다. 각각의 전개 완료 형상에 따른 각도 θ 는 Table 2와 Fig. 10에 정리하였다. 해석에 사용된 부재의 크기 및 물성치는 Table 1과 Fig. 11에 나타내었다. 유닛 개수를 1개부터 4개까지 늘려가며 1단과 2단 시저스 구조물의 11가지 전개 완료 형상에 대하여 모드 해석을 수행하였다. 또한, 일반적인 전개형 시저스 구조물은 한쪽 끝이 고정된 채로 많이 사용되기 때문에 경계조건은 Fig. 12와 같이 Clamped-Free 조건으로 설정하였다.

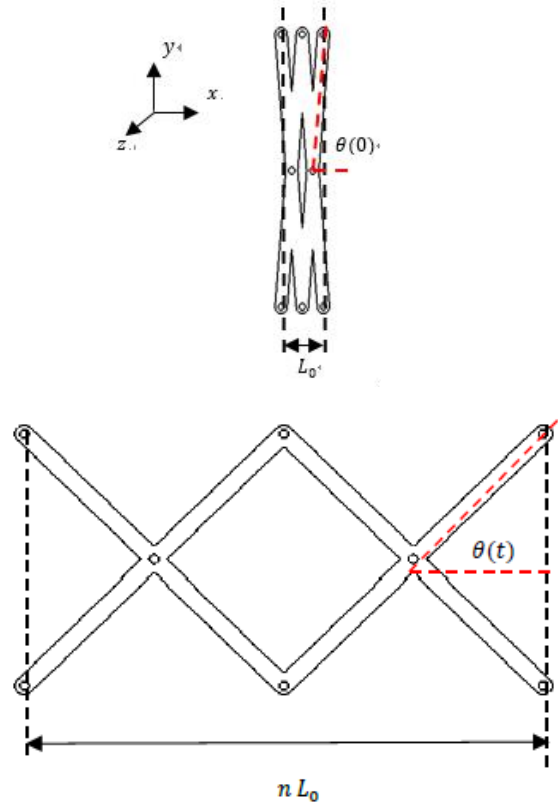


Fig. 9. An unit of scissors structure

Table 2. θ according to deployment steps

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\theta(^{\circ})$	85	79.96	74.84	69.60	64.17	58.47	52.40	45.79	38.34	29.36	16.52

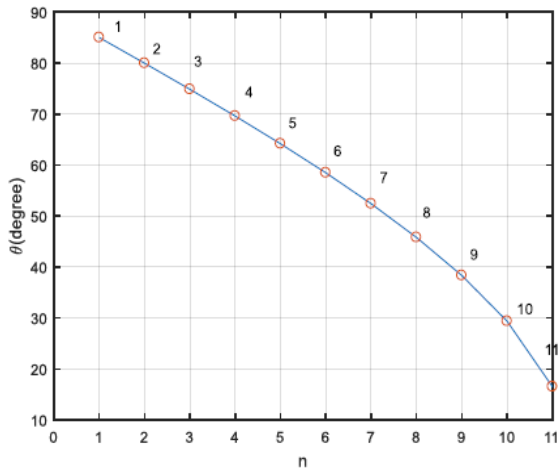


Fig. 10. Value of θ corresponding to each deployed configuration

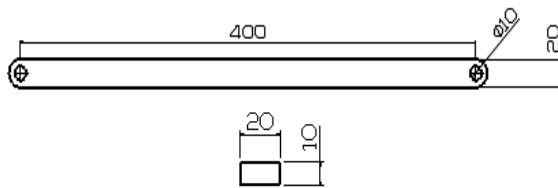


Fig. 11. Shape and dimensions of a bar

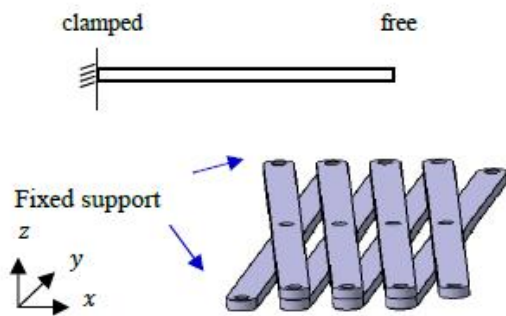


Fig. 12. Boundary condition and configuration of scissors structure

2.2.2 시저스 구조물의 모드 해석 결과

위와 같은 해석 환경에서 먼저 1단 시저스 구조물의 전개 완료 형상에 따른 첫 번째 모드의 모드 형상과 고유 진동수 결과는 Figs. 13, 14에 나타났다. 모든 전개 단계($n=1\sim 11$)에서 첫 번째 모드 형상은 z 방향 굽힘 모드인 것을 확인하였다. 또한, 시저스



Fig. 13. The 1st mode shape of 1-stage scissors structure

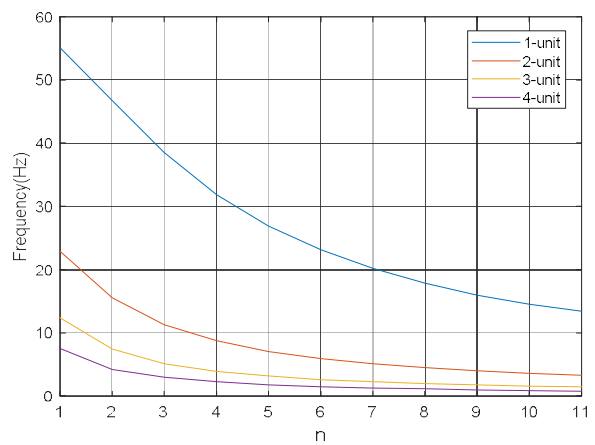


Fig. 14. The 1st mode natural frequencies of 1-stage scissors structures with respect to the deployment step for various unit cases

구조물의 전개 완료 형상이 길어지면서 첫 번째 모드의 고유 진동수가 계속해서 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 유닛의 개수가 늘어나면 총 길이가 증가하기 때문에 마찬가지로 첫 번째 모드의 고유 진동수가 감소하는 것을 알 수 있다.

위의 결과에서 알 수 있듯이, 1단 시저스 구조물의 경우 z 방향 굽힘에 취약할 수 있으므로 이를 보완하기 위해 두 개의 1단 시저스 구조물을 원통형 연결부로 체결한 2단 시저스 구조물을 고려하였다. 실제로 시저스 구조물을 사용할 때는 구조적인 안전성 (Safety)을 위하여 두 단을 연결하여 Fig. 15와 같은 구조를 많이 사용한다[8].

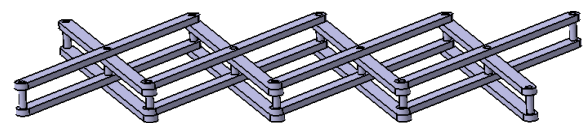


Fig. 15. Configuration of 2-stage scissors structure

두 단을 연결한 2단 시저스 구조물의 경우에도 1단 시저스 구조물과 같은 방식으로 모드 해석을 수행하였다. 연결부의 높이는 30mm로 설정하였고, 유닛 개수는 앞에서와 마찬가지로 1개에서 4개까지 늘려가며 모드 해석을 수행하였을 때, 첫 번째 및 두 번째 모드의 모드 형상과 고유 진동수 결과는 Figs. 16~18과 같다.



Fig. 16. The 1st mode shape of 2-stage scissors structure

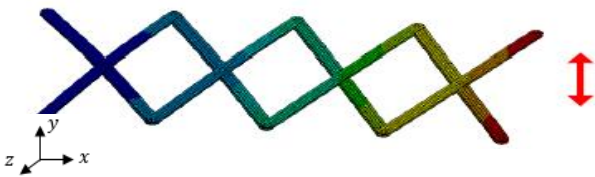


Fig. 17. The 2nd mode shape of 2-stage scissors structure

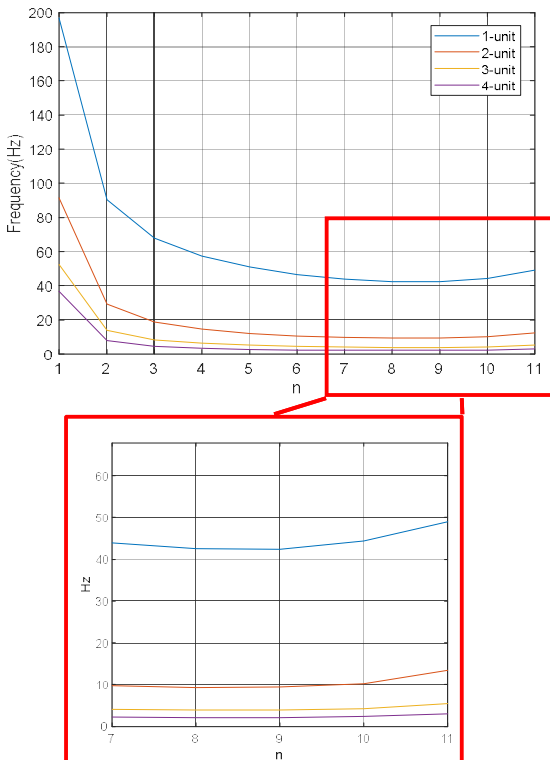


Fig. 18. The 1st mode natural frequencies of 2-stage scissors structures with respect to the deployment step for various unit cases

Figure 18에서 확인할 수 있듯이, 2단을 연결한 시저스 구조물도 전개 형상의 길이가 증가함에 따라 첫 번째 모드 고유 진동수가 전반적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 2단 시저스 구조물의 결과는 1단 시저스 구조물의 결과와는 몇 가지 차이점이 있다. 첫째, 1단 시저스 구조물의 경우에는 구조물의 전개 완료 형상에서의 구조물 길이가 길어짐에 따라 첫 번째 고유 진동수가 계속해서 감소하였지만, 2단 시저스 구조물의 경우에는 고유 진동수가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 또한, 구조물이 여러 유닛으로 이루어지더라도 $n = 9 \sim 11$ 부분에서 첫 번째 모드의 고유 진동수가 증가하는 경향성은 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 2단 시저스 구조물의 경우, 구조물을 보다 길게 전개할 경우 짧게 전개할 때보다 높은 강성을 가질 수 있음을 시사한다. 둘째, 1단 시저스 구조물의 경우에는 첫 번째 모드 형상은 모든 전개 구간에서 공통적으로 Fig. 13과 같이 z 방향으로 진동하였다. 하지만 2단 시저스 구조물의 경우에는 유닛 개수가 변하더라도 공통적으로 $n = 1 \sim 10$ 에서는 첫 번째 모드 형상이 Fig. 16과 같이 z 방향으로 진동하였지만, 가장 길게 전개된 상태인 $n = 11$ 에서는 모드 형상이 Fig. 17과 같이 y 방향으로 진동하는 것을 확인할 수 있었다.

추가적으로, 2단 시저스 구조 연결부의 높이가 구조물의 굽힘 강성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 2단 시저스 구조물의 단일 유닛 구조에 대하여 연결부의 높이를 50mm, 70mm로 바꿔가며 모드 해석을 수행하였다. Fig. 19와 같이 연결부의 높이가 높아짐에 따라 첫 번째 모드의 고유 진동수가 전체적으로 증가하며, 50mm, 70mm 높이의 연결부를 가진 구조물 역시 전개 단계에 따른 첫 번째 모드 고유진동수의 경향성이 30mm인 경우와 동일한 것을 확인할 수 있다.

2.2.3 강성 변화 원인 분석

앞의 결과에 따르면, 1단 전개형 시저스 구조물은 전개 완료 형상의 길이가 길어짐에 따라서, 즉, n 이 증가함에 따라서 첫 번째 모드의 고유 진동수가 감소한다. 하지만, 두 단을 연결한 구조물에서는 한 단으로 이루어진 구조물의 고유 진동수 변화와는 차이점이 있음을 확인하였다.

이 절에서는 1단과 2단 시저스 구조물의 전개 완료 형상에 따른 강성 변화의 원인에 대해 분석하고, 널리 알려져 있는 보 이론을 이용하여 좀 더 넓은 범위에서 시저스 구조물의 강성을 예측할 수 있도록 한다. 일반적인 보는 형상이 정해지면 강성 또한 정해지지만, 전개형 시저스 구조물의 경우에는 전개되면서 형상과 강성이 변한다. 따라서, 시저스 구조물은 전개에 따라 길이와 형상이 변하는 하나의 보라고 가정하였다.

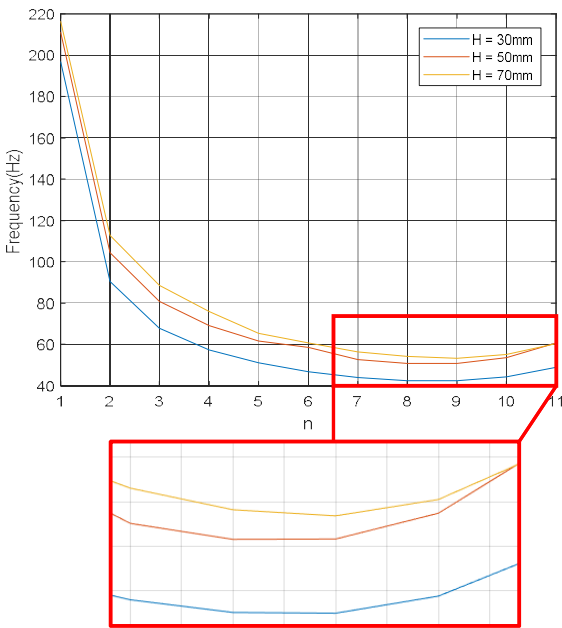


Fig. 19. The 1st mode natural frequencies of 2-stage scissors structure(1-unit) with respect to the deployment step for three different height cases

보의 고유 진동수에 대한 이론은 Euler-Bernoulli 보 이론과 Timoshenko 보 이론으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. Euler-Bernoulli 보 이론은 수식이 복잡하지 않지만 보의 전단 변형과 회전 관성 효과를 고려하지 않는다. 이에 반해, Timoshenko 보 이론은 전단 변형과 회전 관성 효과를 고려하여 좀 더 정확하다는 장점이 있지만 많은 변수를 포함하고 수식 역시 간단하지 않다고 알려져 있다[9]. 본 논문에서는 Euler-Bernoulli 보 이론을 이용하여 전개형 시저스 구조물의 전개 완료 형상에 따른 첫 번째 모드의 고유 진동수 변화에 대해 분석한다.

Clamped-Free 경계 조건일 때 Euler-Bernoulli 보 이론에서 보의 n번째 모드 고유 진동수 수식은 다음과 같다[10].

$$\omega_n = \frac{\beta_n^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

$$\cos \beta_n \cosh \beta_n + 1 = 0$$

$$\beta_1 = 1.8751, \beta_2 = 4.6941,$$

$$\dots, \beta_n = \frac{(2n-1)\pi}{2} \quad (n > 5)$$
(4)

E : 탄성 계수, I : 단면 이차 모멘트,
 ρ : 밀도, A : 단면적, l : 보의 길이,
 β_n : n번째 모드에서의 상수

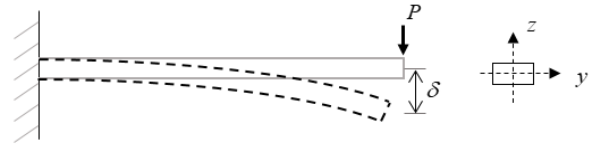


Fig. 20. Deflection of a loaded beam

시저스 구조물은 일반적인 보에 비해 복잡한 형상을 갖기 때문에 이론적인 단면 이차 모멘트 I 값을 구하기에 어려움이 있다. 전개에 따라 변하는 단면 이차 모멘트는 Fig. 20과 같이 보의 끝단에 하중이 걸렸을 때의 처짐과 단면 이차 모멘트의 관계식을 이용하여 결정한다. 여기서 단면 이차 모멘트는 y축에 대한 단면 이차 모멘트를 말하며, 1단과 2단 시저스 구조물의 전개 시 단면 이차 모멘트 변화는 각각 Fig. 21~22와 같다.

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI_y}$$
(5)

P : 하중, δ : 처짐

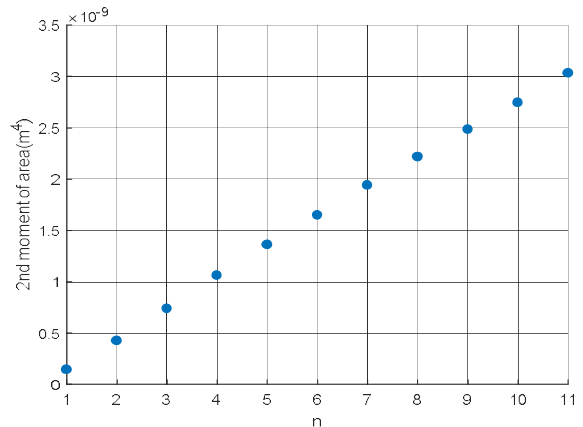


Fig. 21. The 2nd moment of area of 1-stage scissors structure

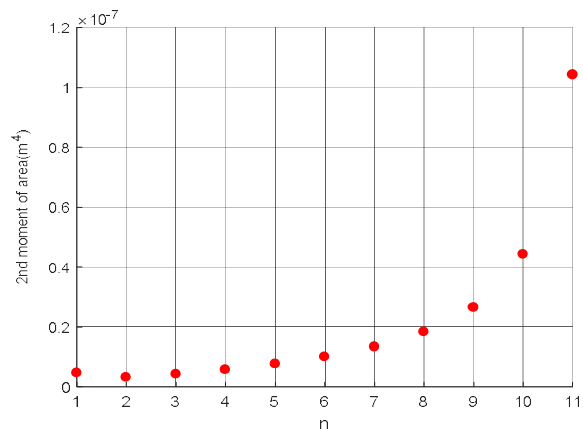


Fig. 22. The 2nd moment of area of 2-stage scissors structure

단면 이차 모멘트는 단면과 관련이 있기 때문에 구조물을 이루는 유닛 개수에는 영향을 받지 않는다. 1단 시저스 구조물의 단면 이차 모멘트는 구조물의 전개 길이에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 2단 시저스 구조물의 단면 이차 모멘트는 $n = 9 \sim 11$ 에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

이를 통해 얻은 단면 이차 모멘트 값을 포함한 다른 변수들을 Euler-Bernoulli 보 이론의 고유 진동수 식인 수식 (4)에 대입한 결과와 유한요소 해석 결과 (ANSYS)를 함께 나타내면 Fig. 23과 Fig. 24와 같으며, Fig. 23은 1단 시저스 구조물, Fig. 24는 2단 시저스 구조물의 결과를 나타낸다.

1단 시저스 구조물의 결과와 달리, 2단 시저스 구조물의 첫 번째 모드 고유 진동수 변화에서는 특정

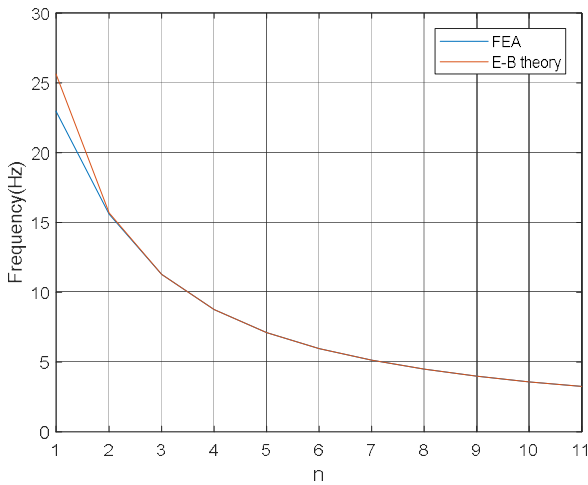


Fig. 23. The 1st mode natural frequencies of 1-stage scissor structure obtained by FEA and beam theory

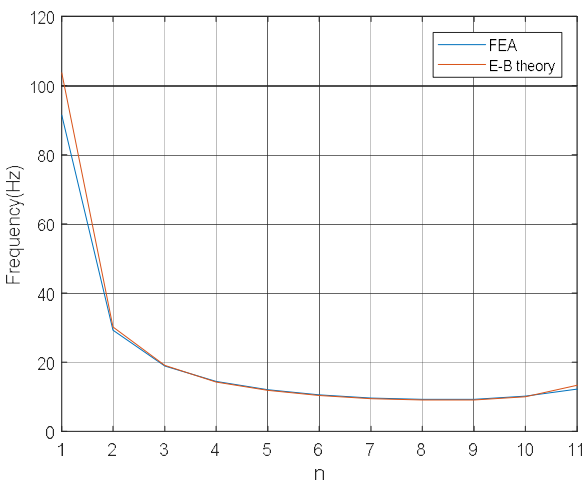


Fig. 24. The 1st mode natural frequencies of 2-stage scissor structure obtained by FEA and beam theory

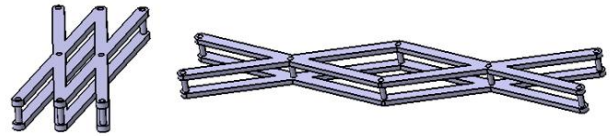


Fig. 25. Configuration of 2-stage scissor structure at the early stage(left) and ending stage of deployment(right)

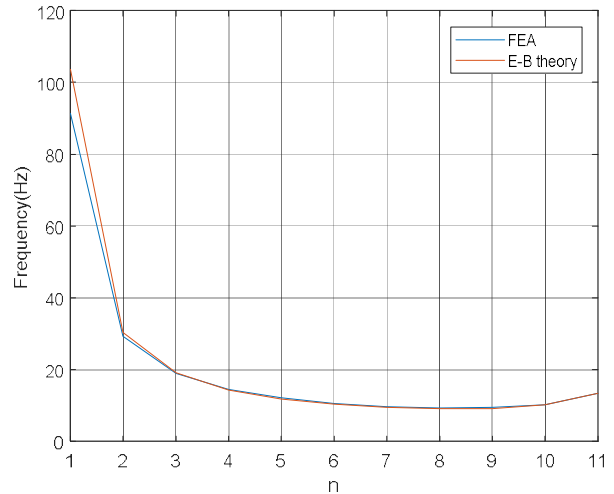


Fig. 26. Natural frequencies of bending mode in z-direction of 2-stage scissor structure obtained by FEA and beam theory

전개 길이부터 n 이 증가함에 따라서 고유 진동수가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 수식 (4)에서 알 수 있듯이, 보의 고유 진동수에 영향을 미치는 변수는 단성 계수, 단면 이차 모멘트, 단면적, 보의 길이 등 다양하다. 본 연구에서 분석한 1단과 2단 시저스 구조물은 다른 변수는 동일하지만, Figs. 21, 22와 같이 전개에 따라 단면 이차 모멘트 변화 양상에 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 2단 시저스 구조물은 전개 후반부에서 길이의 증가량보다 단면 이차 모멘트의 증가량이 급격하게 커지면서 첫 번째 모드의 고유 진동수가 증가하는 것으로 판단된다.

또, Fig. 23과 Fig. 24를 보면, n 이 작을 때는 FEA 결과와 보 이론을 이용하여 얻은 결과의 차이가 크지만, n 이 증가하면서 차이가 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 원인으로서는, n 이 작을 때는 Fig. 25의 왼쪽 그림과 같이 상대적으로 넓은 단면 형태의 보 형상을 띄어서 전단 변형 및 회전 관성 효과가 크므로 Euler-Bernoulli 보 이론 결과와 FEA 결과의 차이가 크며, n 이 클 때는 Fig. 25의 오른쪽 그림과 같이 단면 형태가 얇아지고 길이 대비 높이가 작아져서 전단 변형 및 회전 관성 효과 역시 작아지면서 보 이론 결과와 FEA 결과가 잘 맞아떨어지기 때문이라고 판단된다.

추가적으로, 2단 시저스 구조물의 결과에 해당하는 Fig. 24에서는 가장 길게 전개된 경우인 $n=11$ 인 경우에서 FEA 결과와 보 이론을 통해 얻은 결과의 차이가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 모드 해석 결과에서 말한 바와 같이 $n=11$ 인 경우에는 첫 번째 모드 형상이 $n=1\sim 10$ 일 때와는 달리 y 방향으로 진동하기 때문이다. 만약, 첫 번째 모드와 고유 진동수를 비교하는 것이 아니라 z 방향 굽힘 모드의 고유 진동수를 비교하여 그래프로 나타내면 Fig. 26과 같으며, n 이 클 때 두 값의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 전개형 시저스 구조물에 대해 동역학적 모델을 수립하여 전개 속도 및 각 조인트에 걸리는 내력 등 전개 거동을 분석하였다. 또한, 전개 완료 형상에 따른 구조물의 강성 변화를 확인하기 위해 1, 2단 시저스 구조물에 대하여 전개를 단계적으로 나누어 각각에 대해 모드 해석을 수행하였다. 모드 해석 결과를 통해, 전개형 시저스 구조물은 전개되면서 길이가 증가할 때, 굽힘 모드의 고유 진동수가 단순히 감소하지 않는 것을 확인하였다. 또한, 좀 더 넓은 범위에서 시저스 구조물의 강성을 예측할 수 있도록 하기 위해 Euler-Bernoulli 보 이론을 이용한 고유 진동수 결과와 FEA 모드 해석 결과를 비교하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다양한 전개 구동력을 이용하여 시저스 구조물을 전개할 때 각 조인트에 걸리는 하중 또는 전개 속도 등 전개 거동을 예측하는 데 사용될 수 있을 것이며, 구조물의 전개 시 주요 모드의 고유 진동수 변화를 확인하여 강성 요구 조건에 충족하는 전개 종료 시점 또는 전개 완료 형상을 선정하는데 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2019년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업(2018M1A3A3A02065888)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- 1) Fenci, G. E., and Currie, N. G., "Deployable Structures Classification: A Review," *International Journal of Space Structures*, Vol. 32, No. 2, 2017, pp. 112~130.
- 2) Suh, J. E., Jeong, S. Y., and Han, J. H., "A Two-Dimensional Modular Deployable Truss Structure with Bistability," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 335~350.
- 3) Sokolowski, W. M., and Tan, S. C., "Advanced Self-deployable Structures for Space Applications," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 44, No. 4, 2007, pp. 750~754.
- 4) Lee, S. Y., Jeong, S. Y., Choi, Y. H., and Cho, K. D., "Mechanism Modeling and Analysis of Deployable Satellite Antenna," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 7, 2014, pp. 601~609.
- 5) Miyazaki, Y., "Deployable Techniques for Small Satellites," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 106, No. 3, 2018, pp. 471~483.
- 6) Puig, L., and Heo, K., "A review on large deployable structures for astrophysics missions," *Acta Astronautica*, Vol. 67, Jul-Aug. 2010, pp. 12~26.
- 7) Takatsuka, M., and Ohmori, H., "Dynamic Structural Analysis of Deployment of Scissors Structure in Space," *International Journal of Space Structures*, Vol. 28, No. 1, 2013, pp. 1~13.
- 8) Hernandez, M., and Carlos, H., *Deployable Structures*, M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1987.
- 9) Huang, T. C., "The effect of rotatory inertia and of shear deformation on the frequency and normal mode equations of uniform beams with simple end conditions," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 25, Dec. 1961, pp. 579~584.
- 10) Inman, D. J., *Vibration with Control*, John Wiley & Sons, 2017.