

탄성 스프링으로 구동되는 우주 전개 구조물

Deployable Spatial Structures Operated by Elastic Spring Members



김 재 열*
Kim, Jae-Yeol



우 밍 어**
Wu, Minger

1. 개요

본 기사에서는 우리가 주변에서 쉽게 볼 수 있는 스프링 탄성 제품을 구동축으로 하는 단층 전개형 트러스 구조물을 소형 위성에 적용할 수 있도록 참고문헌¹⁻⁴⁾을 중심으로 소개하고자 한다. 접힌 상태에서 평면 정육각형으로 자체 전개가 가능하도록 설계 및 제작된 단층 전개형 트러스 구조물의 전개 성과 사용성을 수치 해석을 통해 입증하는 방법을 알아보하고자 한다.

전개형 구조물(Deployable structures)은 대규모 우주 안테나를 포함한 우주 응용 분야에서 널리 사용된다. 미국 등 우주 개발에 박차를 가하고 있는 국가에서는 전개-접힘 비와 적절한 경량성을 갖춘

구조물 개발을 위한 다수의 연구가 수행되고 있다. 전개형 트러스 구조물(Deployable truss structures)은 여러 우수한 기능을 지니고 있어 전형적인 전개형 구조물로 활용되어 왔다. 전개형 트러스 구조물은 독립적으로 제작되는 일단의 표준 모듈로 조립할 수 있기 때문에 제조 효율성이 비교적 높으며, 각 모듈의 전개 절차에 대한 테스트와 디버깅(Debugging)을 독립적으로 수행할 수 있다. 또한 전개 과정에서 높은 수준의 구조적 강성, 안정성 및 신뢰성을 지니고 있어 전개형 우주 구조물 중 가장 인기가 많다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 큰 크기의 위성 안테나에 대한 요구가 증가하면서 전개형 트러스 구조물이 다른 혁신적인 구조물에 상응하는 성능을 달성하는 것이 어려워졌다. 문제의 주된 이유는 안테나의 크기가 커지면서 트러스 구조물에 요구되는 재료가 기하급수적으로 증가하게 되는데, 이로 인하여 안테나가 중량을 초과하여 발사 조건을 충족하지 못할 수 있다는 것이다. 이로 인하여 전개형 트러스 구조물은 피코 및 나노 위성

* 협성대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Hyupsung University, Ph.D.

** 상해 통지대학 건설공학과, 공학박사
Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai, Ph.D.

과 같은 소규모 우주 구조물에 더 적합하다. 소형 위성은 최근 몇 십 년 동안 연구자들의 관심을 받아 왔으며, 이와 동시에 새로운 임무를 수행하기 위한 혁신적인 구조물을 필요로 하게 되었다.

기존의 전개형 트러스 구조물은 대규모 우주 구조물에서 좋은 성능을 보이더라도 소형 위성에 직접 적용하기란 거의 불가능하였다. 일반적으로 피코 및 나노 위성은 작은 크기, 가벼운 무게, 저비용으로 유명하다. 그러나 위성의 소형성(Compactness)에는 전개를 위한 전력 또는 에너지 공급의 한계가 있다. 예를 들어 케이블 또는 모터로 구현되는 구동 및 감쇠(Damping) 기구는 대규모 위성에서 잘 작동하더라도 소규모 위성에서 사용하는 것은 현실성이 떨어진다. 또한 전개형 구조물은 전체 위성 시스템의 경량성으로 인하여 질량 비율이 상대적으로 높아 전개 진행 과정과 전개가 완료된 상태의 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 개념 설계 외에 전개성과 사용성을 모두 검증할 필요가 있다.

본고에서는 스프링 탄성 부품으로 구동되는 단층 전개형 트러스 구조물의 개념 설계 및 점검 사항을 소개한다. 단층 전개형 트러스 구조물의 설계 개념은 전개된 상태에서 단층 평면 형상의 형상을 겨냥한다는 점에서 기존의 트러스 안테나와 구별된다. 스프링 탄성 부품으로 구성된 구동 시스템은 전개에서 핵심적인 역할을 한다. 탄성 부품은 구조물의 전개를 위한 구동력을 제공할 뿐만 아니라 전개된 상태에서 구조물의 강성을 유지하기 때문에 복잡한 고정 장치가 추가로 필요하지 않다.

이와 더불어 실제 위성에서 매우 중요한 평탄도와 모드 주파수(Modal frequency)를 포함하여 전개된 상태에서 새롭게 제안되는 트러스 구조의 사용성도 살펴본다.

2. 구조물 설계

2.1 개요

전개형 트러스 구조물이 충족해야 하는 요구 조

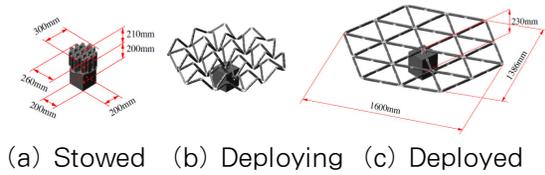
건은 프로젝트에 따라 차이가 있지만 일반적으로 경량성, 높은 전개-접힘 비, 전개 용이성이 해당된다.

전개형 트러스 구조물은 경량성 조건에 적합하도록 설계되어야 한다. 중량을 초과할 경우 발사 과정에서 위성에 가해지는 관성 효과가 커지고, 위성의 동적 반응에 큰 영향을 미치게 되며, 전개 과정 통제 신뢰성이 떨어진다. 또 다른 주요 요구 조건은 구동 시스템에 의해 크게 좌우되는 전개 절차이다. 전개형 구조물은 전기 모터 시스템, 팽창형 시스템, 구조물 재료의 탄성 등을 기반으로 구동할 수 있다. 하지만 크기와 질량뿐만 아니라 전기 에너지에도 한계가 있는 소형 위성에서 전기 모터 구동 시스템은 적절하지 않다. 이에 대한 해결책으로 스프링과 같은 탄성 부품을 사용할 수 있다. 탄성 부품으로 구동하는 전개형 트러스 구조물은 외부 구동 시스템 없이도 짧은 시간 내에 전개될 수 있다. 전개형 트러스 구조물은 제작 과정에서 효율성과 신뢰성이 높기 때문에 소형 위성에서 적절하다.

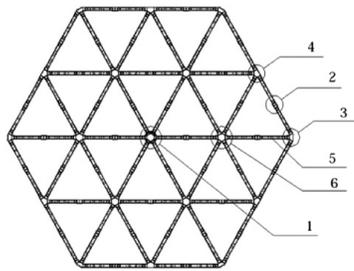
ZJU-피코-위성 II 미션에 적용된 단층 전개형 구조물 모형 설계의 개략적 사항에 대해 소개하고자 한다.

2.2 구조물의 구성

본고에서 소개하고자 하는 전개형 구조물은 <Fig. 1>에 도해된 것과 같이 위성에 고정되어 운송되고, 우주에서 평면 정육각형으로 전개된다. 전개된 상태에 있는 구조물의 크기와 형상이 <Fig. 2>에 나타나 있다. 평면 정육각형은 전개되는 동안 동일한 움직임을 보이는 24개의 정삼각형으로 구성된다. 각 전개형 모듈에서 6개의 부재는 6개의 조인트로 연결되어 있으며, 스프링을 포함한 탄성 중합체는 구조물 전개를 위한 구동력을 제공한다. 미아드 연결 구조물(Myard linkages)과 같은 다른 전개형 트러스 구조물과 달리 전개형 모듈은 크기가 동일한 관부재로만 이루어져 있으며, 모든 부재는 동일한 동적 거동을 보인다. 탄성 중합체는 전개 액추에이터와 반고정 장치 역할을 한다.



(a) Stowed (b) Deploying (c) Deployed
 <Fig. 1> States and dimensions of the deployment of the structure



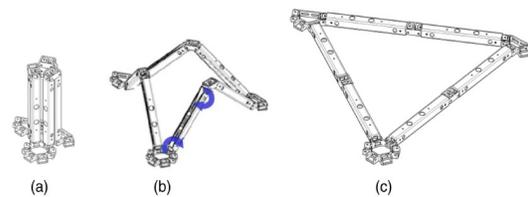
1- central joint; 2- 2-rod joints; 3- 3-rod joints;
 4- 4-rod joints; 5- members; 6- 6-rod joints.

<Fig. 2> Deployed structure with members and joints

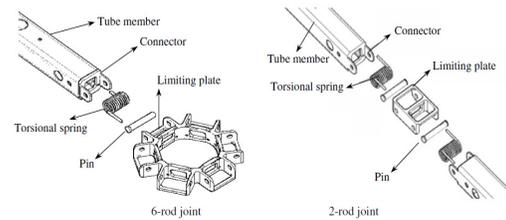
성능을 확인하기 위하여 전개된 상태에서 유사한 평면 형상을 하고 있으면서 동일한 연결 구조물을 사용하는 다른 전개형 구조물과 비교하였다. 이를 위해 직경 1.6m 플랫폼 모형과 관련하여 4가지 구조 개념을 설계하였다. 직경 1.6m 모형을 조립하기 위한 유닛의 수는 NUnit이다. D:V는 전개된 직경(cm) 대 접힌 상태의 부피(cm³) 비, A:V는 전개된 상태의 구조물 면적(cm²) 대 접힌 상태의 부피(cm³) 비, D:m은 전개된 직경(cm) 대 질량(kg) 비를 나타낸다. 다른 3가지 연결 구조물 개념과 비교한 결과, D:V와 A:V 측면에서는 장점을 지니고 있지만 D:m 측면에서는 설득력이 떨어진다. 즉, 제안된 개념은 패키징 효율이 우수하지만 경량성은 그다지 큰 우월성을 보이지 못한다.

전개형 구조물은 <Fig. 3>에 제시된 것처럼 탄소-섬유 관부재 및 알루미늄 합금 조인트로 구성되어 있다. <Fig. 4>와 같은 조인트에 <Fig. 5>와 같은 스프링을 설치하여 중앙 조인트, 2-로드 조인트, 3-로드 조인트, 4-로드 조인트 및 6-로드 조인트를 포함한 5가지 유형의 조인트로 설계하였다. 여

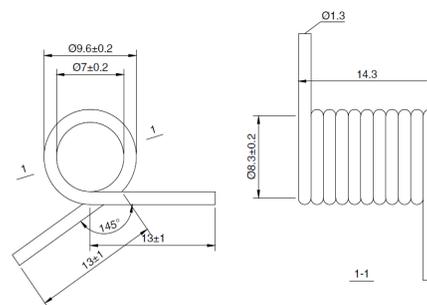
기에 사용된 스프링의 각 조인트 유형은 유사한 동적 기구를 채택하였다. 부재는 엔드부에서 커넥터에 의하여 조인트에 부착되었으며, 엔드부에서 핀이 커넥터와 조인트의 구멍을 통과한다. 관부재는 스테인리스 비틀림 스프링을 탄성 부품으로 적용하는 방식으로 구동되어 핀 주변을 회전하며, 비틀림 스프링은 전개력을 제공하고 반고정 장치 역할도 한다.



<Fig. 3> Deployed structure with members and joints



<Fig. 4> Joints detail



<Fig. 5> Torsional spring

2.3 전개 과정 설계

구조물의 전개를 위한 전개력과 고정 시스템을 위한 고정력 설계는 다음 공식에 따라 설계되었다.

$$M = k \cdot \Delta\phi \tag{1}$$

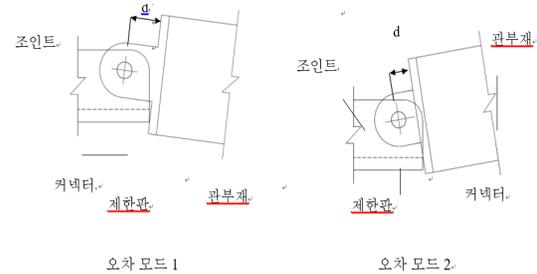
M : 스프링의 비틀림 모멘트
 k : 비틀림 스프링의 강성
 $\Delta\phi$: 비틀림 모멘트의 탄성 변형

스프링의 재료는 극한 열 환경을 견딜 수 있는 12Cr18Ni9이다. 이러한 측면을 고려하여 <Fig. 5>에 제시된 것처럼 스프링 부품을 설계하였다. 결과적으로 k 는 $1.85\text{N} \cdot \text{mm}/^\circ$ 이며, 전개 및 고정에 대한 탄성 변형 $\Delta\phi$ 은 각각 90° 와 35° 이다. 이에 대응하는 액추에이터 모멘트와 고정 모멘트는 각각 $166,50\text{N} \cdot \text{mm}$ 와 $64,75\text{N} \cdot \text{mm}$ 이다. 스프링의 변형은 탄성 영역 이내였다. 이에 따라 관부재를 접을 경우 각 비틀림 스프링은 최대 탄성 전위 에너지를 지니며, 초기 비틀림 각은 125° 이다. 전개가 시작되면 탄성 스프링은 커넥터가 조인트의 제한판에 접촉할 때까지 부재를 구동하며 조인트가 추가 회전하지 못하게 한다. 그 다음 스프링에 저장된 잔여 비틀림력으로 구조물을 조였으며, 잔류 비틀림 각도는 35° 였다. 조인트의 재료로 알루미늄 합금을 사용하였다. 구조 중량은 설계에서 핵심적인 요소이므로 질량을 줄이고 응력 집중을 피하기 위하여 형상 최적화를 수행하였다.

2.4 제작 및 조립

구조물의 조인트와 커넥터는 알루미늄 합금 2124로 제작하였다. 이 금속 부품의 가공 전도는 오차 해석 결과에 기초하여 정의된다. 특히 조인트의 제한판과 커넥터는 전개된 상태에서 전체 구조물의 평탄도에 매우 중요하다. 커넥터의 오차를 예로 들면 <Fig. 6>에 도해된 것처럼 핀의 중앙부터 커넥터의 수직판까지의 거리는 조립된 형상에서 완전히 다른 오차로 이어질 수 있다. 오차 모드의 2가지 유형을 살펴보고 제작 전에 기하학적 요구 조건을 도출하였다. 탄소 섬유 보강 중합체(CFRP) 관부재의 제조 정확성은 0.05mm 였다. 특히 평탄도에 중요한 매개 변수의 최대 허용 오차는 0.02mm 로 설정되었

다. 관부재는 사전 제작된 주형에 탄소 섬유를 결합하여 제작한 후 자르고 에폭시 수지로 굳혔다.



<Fig. 6> Error modes

2.5 전개 테스트

구조물의 전개성을 확인하기 위하여 전개 과정을 분석 및 테스트하였다. 일반적으로 전개 과정에 대한 동적 해석에서는 2가지 방법 즉, 무어-펜로즈 일반화 역행렬법과 구속된 다물체 동역학법을 사용한다. 무어-펜로즈 일반화 역행렬법은 운동 방정식과 구속 방정식에서 미지수로 절점의 데카르트 좌표만 사용한다. 그 다음 무어-펜로즈 일반화 역행렬에 의한 변위의 독립된 모드를 사용하여 절점 변위를 종속 변수에서 독립 변수로 변환한다. 반면 구속된 다물체 동역학법은 ADAMS와 같은 상용 프로그램에서 채택하는 일반화 좌표를 사용하는 오일러-라그랑주 방정식에 기반을 두고 있다. 운동의 일반화 방정식은 다음과 같다.

$$M(q, t)\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = F(q, \dot{q}, t) \quad (2)$$

$$\phi(q, t) = 0$$

2.6 구조물의 사용성

앞서 언급한 것처럼 제안된 전개형 구조물은 고정 장치를 사용하지 않는 대신에 전개된 상태에서 잔류 인장 모멘트를 사용하는 비틀림 스프링이 설치되어 있다. 따라서 평탄도와 진동 모드를 포함하여 전개된 상태에서 구조물의 성능을 검증할 필요가 있다.

2.7 평탄도 측정

전개형 구조물의 표면 정확성을 평가하기 위하여 전개된 상태에서의 평탄도를 검토할 필요가 있다. 평탄도는 참조 평면에 대한 각 부재의 각도로 설명한다. 전개된 구조물의 관부재 각도는 요구조건에 따라 참조 평면에 대비한 허용값 미만일 것으로 예상된다. 평탄도는 비접촉 측정 시스템 중 하나인 디지털 사진 측량 시스템에 기초하여 측정한다. 이 시스템은 높은 정확성, 조작 용이성, 환경 온도와 진동 등의 간접 요인에 대한 안정성으로 인하여 널리 사용된다. 디지털 사진 측량 시스템에는 사진 측량 소프트웨어 포토 모델러, 표적(측정하는 핵심 포인트), 고화소 디지털 카메라, 보정 보드 및 척도가 포함된다. 전개된 구조물의 참조 평면은 조인트에서 표적의 좌표를 사용하여 최소 자승 평면 피팅법으로 결정하며 다음 방정식을 충족하여야 한다. 즉, 3차원 평면 방정식에서 3가지 계수를 도출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$z_i = a_0 x_i + a_1 y_i + a_2 \quad (4)$$

식 (3)에서 a_0, a_1, a_2 의 계수를 구할 수 있고, 다음과 같이 참조 평면의 법선 벡터를 구할 수 있다.

$$\vec{n} = (a_0, a_1, -1) \quad (5)$$

반면 부재의 방향 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{s} = \vec{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i) \quad (6)$$

마지막으로 부재와 참조 평면 간 각도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{|\vec{n} \cdot \vec{s}|}{|\vec{n}| |\vec{s}|} \right) \quad (7)$$

2.8 주파수 점검

전개된 구조물의 모드 주파수를 식별하기 위하여 모드 분석과 실험 테스트를 수행한다. 기술적 지표에서 요구하는 2Hz를 초과할 경우 특히 기본 주파수를 알아본다.

앞서 언급한 것처럼 커넥터는 전개된 상태에서 제한판과 접촉하며, 부재가 제한판 쪽으로 회전할 경우 접촉으로 인하여 강성이 증가하는 반면 부재가 밖으로 향해 회전할 경우 강성이 감소한다. 상용 소프트웨어 ANSYS(버전 18.1)를 사용하여 모드 분석을 위한 유한 요소 모형을 정립하였다. 핀의 중심 점인 절점 4와 관부재의 끝점인 절점 5의 자유도 5° 즉, 3축(UX, UY, UZ)에 따른 병진 변위와 x-축 및 z-축 주변 회전(ROTX, ROTZ)을 결합하여 핀과 관부재 사이의 회전 거동을 시뮬레이션 한다. 절점 4와 5 사이의 회전 스프링은 비틀림 강성을 정의할 수 있는 COMBIN14 요소로 대체하며, 강성은 1.85 N·mm/°이다. 관부재와 제한판 사이의 접촉 거동은 케이블의 기계적 특성을 지닌 연결 요소로 시뮬레이션 한다. 우선 스프링의 잔류 비틀림 모멘트(각각 64.75N·mm의 크기)가 가해진 전개된 구조물의 정적 분석에서 연결 요소의 비틀림 응력을 계산한다. 그런 다음 스프링의 비틀림 강성과 연결 요소의 압축 응력을 모두 고려하여 모드 분석을 수행한다. 첫 모드 형상은 그릇 형상의 굽은 변형이고, 두 번째와 세 번째 모드 형상은 면외 역전 변형, 네 번째 모드 형상은 면내 회전, 다섯 번째와 여섯 번째 모드 형상은 면외 뒤틀림이다. 이 미션에서 위성은 고도 제어가 필요하며, 공진 진동을 피하기 위하여 시스템의 기본 주파수는 고도 제어의 주파수와 멀리 떨어져야 한다. 전개형 트러스 구조물의 기본 주파수는 2.28Hz인데 이는 2Hz 이상의 요구 수준을 충족한다.

3. 고찰 및 결론

대규모 전개형 안테나와 반사 장치 등 전개형 트러스 구조물은 항공 우주 공학에서 제안 및 사용되고 있다. 최근 몇 십 년 동안 피크 및 나노 위성을 포함한 소형 위성의 점진적인 발전으로 새로운 임무를 수행하기 위한 혁신적인 구조물이 요구되고 있다. 전개형 트러스 구조물은 소규모 구조물에 대한 적용 가능성이 더 높다고 보는 것이 타당하지만 가벼운 무게와 작은 크기에 대한 엄격한 요구로 인하여 전개형 트러스 구조물의 전통적인 개념을 소형 위성에 적용하기 어렵다.

본고에서는 탄성 모터 없이 탄성 부품으로 구동되는 단층 전개형 트러스 구조물을 소개하였다. 가장 중요한 특성 중 하나로 비틀림 스프링에 저장된 에너지는 전개를 구동할 뿐만 아니라 전개된 구조물의 강성과 평탄도를 유지하는 기능도 한다.

구조물의 세부적인 설계와 실현 가능성도 살펴보았다. 질량을 줄이기 위하여 조인트의 형상을 최적화 하고자 하였으며, 최적화 된 조건에 맞는 구조물의 부품을 제작하여 16m 직경을 가진 전개형 구조물 모형을 만들어 보았다.

또한 제안된 전개형 구조물의 전개성과 사용성을 검증하기 위하여 수치 분석과 테스트를 수행하였다. 그 결과, 전개된 구조물은 만족할만한 평탄도를 지니고 있는 것으로 확인되었다. 모드 분석과 주파수 식별 테스트에 따르면 전개된 구조물의 기본 주파수는 약 2.3Hz로 요구 수준을 충족한다. 결론적으로 제안된 단층 전개형 트러스 구조물 개념은 소형 위성 시스템에 적용할 수 있는 엄청난 잠재력을 지니고 있다고 할 수 있다.

탄성체를 사용한 복잡하고 세밀한 위성용 전개 구조물의 설계와 실제 사용하기 위한 사용성 점검 방법에 대해서도 개략적으로 알아보았다. 제작 및 테스트, 조립된 형태, 조인트 부분 등 자세한 내용 및 데이터는 소개가 제한적이니 참고문헌을 참고하기 바란다.

지금까지 소개한 내용은 이 분야의 선진국이라고 할 수 있는 중국의 대학 연구실에서 일구어 낸 결과이며, 실제 위성에 사용되어 지금 우리의 하늘을 선회하고 있다. 다양한 분야에서 사용되는 전개 구조물, 특히 최첨단 분야인 우주용 전개 구조물의 설계 및 제작에 응용 역학을 하는 우리 모두가 조금 더 관심을 가질 때가 아닌가 생각한다.

감사의 글

본 기사는 한국연구재단(NRF-2016R1A2B4014562) 중견연구사업의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

Reference

1. Wu, M., Zhang, T., Xiang, P., & Guan, F., "Single-Layer Deployable Truss Structure Driven by Elastic Components", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.32, No.2, 2019
2. Tuo, T. (2016). *Driving System design and thermal analysis of the deployable structure with elastic element* (Master's thesis). Tongji University, China.
3. Zhang, T., Wu, M., & Guan, F., "Deployment Study on a Single-Layer Deployable Truss Structure Driven by Elastic Components", *Journal of the International Association for Shell and Spacial Structures*, Vol.57, No.4, pp.285~294, 2016
4. Zhang, Y., Li, N., Yang, G., & Ru, W., "Dynamic analysis of the deployment for mesh reflector deployable antennas with the cable-net structure", *Acta Astronautica*, Vol.131, pp.182~189, 2017