

변형에너지 힌지를 갖는 인공위성 태양전지판의 전개 모델 개발

곽문규*

Dynamic Modeling of Satellite Solar Arrays deployable by Strain-Energy Hinge

Moon Kyu Kwak

Abstract

This research is concerned with the dynamic modeling of solar arrays equipped with strain energy hinges (SEH). It is found from experiments that the SEH has nonlinear dynamic characteristics and complex buckling behavior, which is difficult to explain theoretically. In this paper, we use an equivalent one-dimensional nonlinear torsional spring for the SEH. Assuming that solar panels are rigid, we developed the systematic approach for the derivation of the theoretical model for the solar arrays equipped with the multitudes of the SEH. To this end, the kinematic relation of the displacement vector of each body is derived and then applied to the equations of motion. Lagrangian equations of motion are used for the derivations.

1. 서론

변형 에너지 힌지(SEH)를 갖는 인공위성의 태양판의 전개는 SEH에 저장된 탄성에너지에 의해 이루어진다. SEH는 구조가 간단하며 특별한 해제 장치를 필요로 하지 않기 때문에 국내 인공위성에 장착이 시도되고 있다. 구조적인 단순성에도 불구하고 SEH를 갖는 태양판의 전개에 대한 연구는 Kwak등[1-4]의 연구가 전부이다. SEH는 얇은 박판으로 이루어진 구조물로서 각각의 박판이 가지는 좌굴 특성에 의하여 동적특성이 결정된다. 또한 전개가 좌굴후부터 시작하기 때문에 이론적인 모델링에서 고려해야하는 동특성은 비선형일 수밖에 없다. 실험 결과[2-4]로부터 알 수 있듯이 SEH는 전개 각도에 따라 비선형 강성의 특성을 지니고

있고 특히 좌굴이 발생하는 영역에서의 강성 변화가 매우 심하다. 이런 이유로 SEH에 대한 이론적인 모델링은 쉽지 않은 문제이며 심각한 강성의 변화로 인해 SEH는 실제로 태양판의 전개시 많은 문제점을 유발할 수 있다.

인공위성 태양판의 전개는 천천히 이루어지는 것이 바람직한데 SEH를 사용하는 경우 좌굴전 상태로 돌아가는 미소 각도에서 급격히 전개가 이루어진다. 급격한 전개는 태양판에 부착된 태양 전지판에 충격을 줄 수 있으며 전개후 잔류 진동이 발생해 위성 본체에 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 곽문규 등[4]이 점탄성변형에너지 힌지(VSEH)를 제안하였다. VSEH는 좌굴 모멘트를 감소시켜 급격한 전개를 방지하고 점탄성 감쇠로 인한 감쇠의 증가가 잔류진동을 억제

*동국대학교 기계공학과 교수

하게 되어 유용한 태양판 전개 장치로 사용될 수 있음을 밝혔다[2].

SEH에 대한 기초 연구 [2,3]에서 태양판의 모델링은 2개의 태양판으로 이루어져 있으며 베이스가 고정된 구조에 대해서 운동방정식이 유도되었다. 그러나 우주공간내에서 인공위성은 무중력 상태에 있기 때문에 태양판 전개로 인해 인공위성 본체의 운동이 유발된다. 또한 2개 이상의 태양판이 SEH로 연결되어 전개가 이루어지기 때문에 본 연구에서는 다중의 태양판과 인공위성 본체를 모델링할 수 있는 방법을 유도하였다. 여기서 SEH는 광동 [2,3]이 제안한 1차원 등가 비틀림 스프링을 사용하였다.

각각의 태양판을 강체로 가정하고 Lagrange 방정식을 이용하여 전개방정식을 유도하였는데 각 태양판의 x,y축 변위와 각변위가 기구학적인 상관관계에 의해 연결되었다. 유도된 전개 방정식은 비선형으로 수치모사를 위해서 상용 프로그램인 Matlab이 사용되었다.

2. 동적모델링

Figure 1은 여러개의 태양판과 위성본체가 SEH로 연결되어 있는 모습을 보여주고 있다.

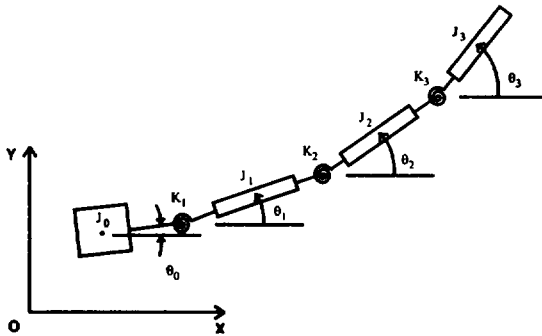


Fig. 1 Deployment Dynamic Model

Lagrange's 방정식을 사용하기 위하여 먼저 운동에너지와 탄성에너지를 유도하여 보자. 두 개의 패널에 대한 운동에너지와 위치에너지는 각각 다음

과 같다.

$$T = \frac{1}{2} m_0 (\dot{R}_{x0}^2 + \dot{R}_{y0}^2) + \frac{1}{2} J_0 \dot{\theta}_0^2 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{R}_{x1}^2 + \dot{R}_{y1}^2) + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \dots + \frac{1}{2} m_n (\dot{R}_{xn}^2 + \dot{R}_{yn}^2) + \frac{1}{2} J_n \dot{\theta}_n^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} k_1 \beta_1^2 + \frac{1}{2} k_2 \beta_2^2 + \dots + \frac{1}{2} k_n \beta_n^2 \quad (2)$$

여기서 m_i, J_i ($i=0, 1, \dots, n$)는 i 번째 태양판의 질량 및 질량관성모멘트를 나타낸다. R_{xi}, R_{yi} ($i=0, 1, \dots, n$)는 태양판의 x,y 변위, θ_i ($i=0, 1, \dots, n$)는 절대 각변위를 나타낸다. 또한 $\beta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$, 즉 상대각도를 나타낸다.

이를 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} z^T \bar{M} z, \quad V = \frac{1}{2} x^T K x \quad (3)$$

여기서

$$z = [R_{x0} \ R_{y0} \ \theta_0 \ R_{x1} \ R_{y1} \ \theta_1 \ \dots \ R_{xn} \ R_{yn} \ \theta_n]^T$$

$$x = [R_{x0} \ R_{y0} \ \beta_0 \ \beta_1 \ \dots \ \beta_n]^T$$

$$\bar{M} = \text{diag}[m_0 \ m_0 \ J_0 \ m_1 \ m_1 \ J_1 \ \dots \ m_n \ m_n \ J_n]$$

$$K = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]$$

(4)

식(4)를 살펴보면 x 는 $(3+n)$ 개의 변수로 이루어지는 반면에 z 는 $3(n+1)$ 개의 변수로 이루어져 있음을 알 수 있다. 운동에너지를 독립변수, x 의 함수로 표현하기 위해서는 기구학적인 상관관계를 이용해야 한다. 먼저 x, y 위치들은 다음과 같은 관계식으로 표현됨을 알 수 있다.

$$R_{x1} = R_{x0} + \frac{l_0}{2} \cos \theta_0 + \frac{l_1}{2} \cos \theta_1$$

$$R_{y1} = R_{y0} + \frac{l_0}{2} \sin \theta_0 + \frac{l_1}{2} \sin \theta_1$$

$$R_{x2} = R_{x0} + \frac{l_0}{2} \cos \theta_0 + l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos \theta_2$$

$$R_{y2} = R_{y0} + \frac{l_0}{2} \sin \theta_0 + l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin \theta_2$$

⋮

$$R_{xn} = R_{x0} + \frac{l_0}{2} \cos \theta_0 + \sum_{i=1}^{n-1} l_i \cos \theta_i + \frac{l_n}{2} \cos \theta_n$$

$$R_{yn} = R_{y0} + \frac{l_0}{2} \sin \theta_0 + \sum_{i=1}^{n-1} l_i \sin \theta_i + \frac{l_n}{2} \sin \theta_n$$

(5)

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 + \beta_1 \\ \theta_2 &= \theta_1 + \beta_2 = \theta_0 + \beta_1 + \beta_2 \\ &\vdots \\ \theta_n &= \theta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \end{aligned} \quad (6)$$

(5)식을 시간에 관해 1차 미분하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{R}_{x1} &= \dot{R}_{x0} - \frac{l_0 \dot{\theta}_0}{2} s\theta_0 - \frac{l_1 \dot{\theta}_1}{2} s\theta_1 \\ \dot{R}_{y1} &= \dot{R}_{y0} + \frac{l_0 \dot{\theta}_0}{2} c\theta_0 + \frac{l_1 \dot{\theta}_1}{2} c\theta_1 \\ &\vdots \\ \dot{R}_{xn} &= \dot{R}_{x0} - \frac{l_0 \dot{\theta}_0}{2} s\theta_0 - \sum_{i=1}^{n-1} l_i \dot{\theta}_i s\theta_i - \frac{l_n \dot{\theta}_n}{2} s\theta_n \\ \dot{R}_{yn} &= \dot{R}_{y0} + \frac{l_0 \dot{\theta}_0}{2} c\theta_0 + \sum_{i=1}^{n-1} l_i \dot{\theta}_i c\theta_i + \frac{l_n \dot{\theta}_n}{2} c\theta_n \end{aligned} \quad (7)$$

(7)식을 이용하면 다음과 같은 관계식이 성립함을 알 수 있다.

$$\dot{z} = T \dot{y} = TS \dot{x} \quad (8)$$

여기서 $y = [R_{x0} \ R_{y0} \ \theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_n]^T$ 이며 T, S 는 식 (5), (6), (7)로부터 유도할 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -l_0 s\theta_0/2 & -l_1 s\theta_1/2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & l_0 c\theta_0/2 & l_1 c\theta_1/2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & -l_0 s\theta_0/2 & -l_1 s\theta_1 & -l_2 s\theta_2 & \dots & -l_n s\theta_n/2 \\ 0 & 1 & l_0 c\theta_0/2 & l_1 c\theta_1 & l_2 c\theta_2 & \dots & -l_n s\theta_n/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

따라서 운동에너지는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{x}^T S^T T^T M T S \dot{x} = \frac{1}{2} \dot{x}^T M \dot{x} \quad (10)$$

라그랑지안(Lagrangian), $L = T - V$ 이며 라그랑지 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = Q \quad (11)$$

감쇠항을 비보존력으로 처리하고 (3)과 (7)식을 이용하면 태양전지판의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M \ddot{x} + (C + \dot{M}) \dot{x} + Kx - \frac{1}{2} x^T \frac{\partial M}{\partial x} \dot{x} = 0 \quad (12)$$

여기서 $M = S^T (T^T M T + T^T \dot{M} T) S$ 이다. T 는 앞에서 구한 T 를 시간에 대해 미분하여 얻을 수 있다. 계산을 요구하는 항은 $\partial M / \partial x$ 인데 각각의 변수에 대하여 유도해야 한다. 본 연구에서는 최종적인 결과만 제시한다.

3. 수치 계산

수치계산을 위해 다음과 같은 값을 사용하였다. 위성본체와 태양판의 질량은 $m_i = 5.0, 0.491, 0.491, 0.491, 0.491$ kg,이고 각각의 길이, $l_i = 0.2, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25$ m이다. 초기조건, $z_0 = [0, 0, 0, \pi/2, -\pi, \pi, -\pi, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ 이며, SEH의 감쇠계수, $c_i = [0.6, 0.6, 0.6, 0.6]$ 을 사용하였다. SEH에 대한 비선형 스프링 상수는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$k_{eq} = \begin{cases} 385N/m & \theta < 0.013rad \\ 5/|\theta| & 0.013rad \leq \theta < 0.02rad \\ 0.6/|\theta| & \theta \geq 0.02rad \end{cases} \quad (13)$$

이와 같은 SEH를 가지고 있는 인공위성을 대상으로 수치계산을 수행한 결과는 다음과 같다.

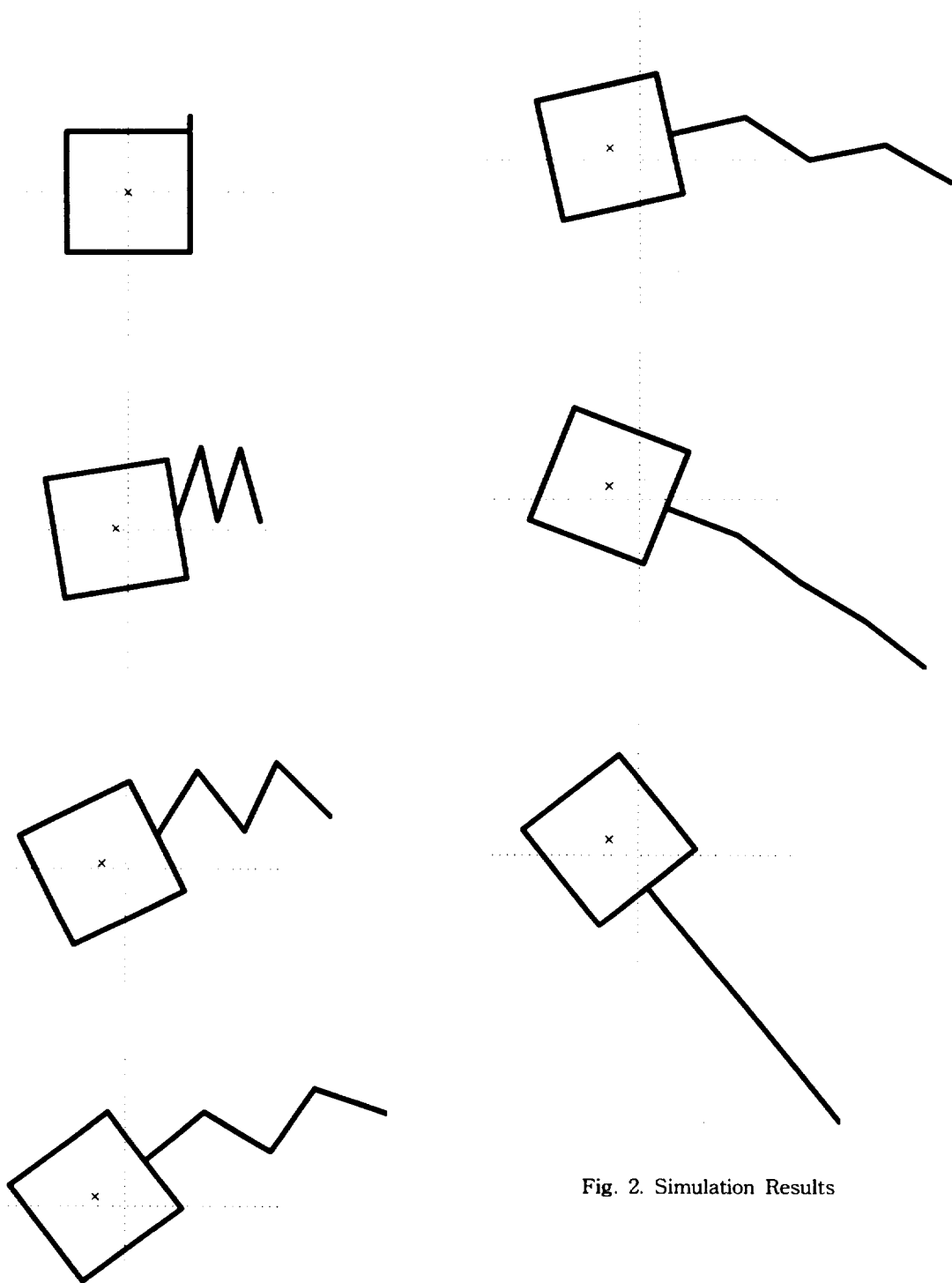


Fig. 2. Simulation Results

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 여러 개의 태양판과 위성본체가 SEH로 연결된 시스템의 동적 모델링 방법을 제시하였다. SEH는 일차원 비선형 비틀림 스프링으로 모델링하였으며 그 값은 하중-변위 곡선으로부터 추정하였다.

운동방정식의 유도를 위하여 위성본체와 태양판 각각에 대한 운동에너지를 유도한 후 각각의 기구학적인 적합조건을 대입하여 독립변수로 이루어진 운동 방정식을 유도하였다. 이 과정에서 조직화된 유도 방법을 제시하였으며 수치계산을 용이하게 수행할 수 있는 모델을 제시하였다.

유도된 운동방정식은 위성본체의 자유도, 즉 x , y 축 운동과 z 축에 대한 각운동에 태양판의 각운동에 대한 식으로 구성된다. 본 연구에서는 임의의 태양판 개수에 대응할 수 있는 정식화 과정을 제시하였다. 태양판이 4개인 경우를 채택하여 수치계산을 수행한 결과 태양판의 전개는 위성 본체의 운동을 가져옴을 알 수 있었다.

앞으로 SEH의 강성에 따라 태양판의 전개가 어떻게 변화하는지에 대한 수치계산과 여러 가지 경우에 대한 실험을 통해 수치계산 결과를 검증할 필요가 있다. 또한 3 차원 모델에 대한 운동방정식을 유도할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 미국 공군 연구소 AFOSR Grant AOARD-99-4008의 지원을 받아 수행되었다. AOARD의 Dr. Thomas Kim과 Dr. Koto White에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. M. K. Kwak, D. Sciulli, W. T. Schlager, R. M. Martin, and Alok Das, "Deployment Dynamic Analysis and Experiments on

ACTEX-II Array Structure", Proceedings of the 35th SDM Conference.

2. 라 완규, 곽 문규, "변형에너지 힌지를 갖는 인공위성 태양판 전개모델 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, 1998년 11월, pp. 280-284.

3. 곽문규, 라완규, 윤광준, "변형에너지힌지를 갖는 인공위성태양판의 전개 운동 해석", 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 서울, 1998년 11월, pp. 269-272.

4. 곽문규, 라완규, 윤광준, "점탄성 변형에너지 힌지를 이용한 인공위성 태양판 전개 장치의 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 대전, 1998년 11월, pp. 285-289.