

가 가

Mathematical modeling and dynamic analysis of tethered satellites with moving mass

정원영* · 정진태†

Wonyoung Jung, Jintai Chung

1. 서 론

테더는 두개의 인공위성 혹은 분리되어 있는 두 개 이상의 서로 다른 구조물을 기계적으로 연결하는 긴 케이블을 지칭한다. 테더가 있는 인공위성은 정상궤도에 안착한 후 기저위성으로부터 테더를 전개하며 중력구배를 안정화의 기능을 하는데 기저위성은 때로는 우주선이나 우주정거장등으로 가정되어 연구가 진행되기도 한다. 최근 해외에서 진행중인 테더가 있는 인공위성 시스템(TSS)에 대한 연구를 살펴보면 단순히 테더가 인공위성의 안정성 확보만을 목적으로 하는 것이 아니다. 예를들면 전기 테더(electric tether)는 지구의 자기장과 테더에 유도된 전기력의 상관관계를 이용하여 인공위성의 궤도를 제어하는 기능을 하도록 연구가 진행되고 있고 지구 궤도 주변에 있는 위험요소를 존재하는 운석들의 비행궤적을 바꾸기 위한 테더-벨러스트 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다. 뿐만아니라 테더의 길이를 증가시켜 우주에서 채취한 샘플을 지구로 가져오는 임무를 수행하는 목적으로 유럽우주국의 주관하에 전세계의 여러대학들이 참가한 YES2 프로젝트를 통해 연구되고 있으며 30km 길이의 테더를 전개하는 실험이 우주공간에서 진행되기도 하였다. 이와 같이 테더에 대한 연구는 인공위성의 자세 제어 외에도 유체 및 물질의 이송, 전기역학적 에너지의 전달등에 사용되기 위하여 그 중요성이 날로 커지고 있다.

본 연구에서는 테더가 있는 인공위성 시스템 및 이동하는 질량을 질점으로 가정하고 Lagrange's equation 에 기초하여 운동방정식을 유도할 것이다. 또한 비선형 방정식에 적합한 시간적분법을 이용하여 동적 거동을 살펴볼 것이다. 질량의 이동에 의한 전체시스템의 무게중심의 변화가 동적거동에 미치는

영향을 알아보고 모델의 타당성을 검증할 것이다.

2. Tether가 있는 인공위성의 운동방정식

2.1 테더가 있는 인공위성의 모델수립

테더에 의해 연결되어 있는 두 개의 인공위성모델은 Fig.1 과 같다. 두개의 인공위성과 이동하는 질량을 질점으로 모델링 하였다. 질량의 이동을 표현하기 위하여 L_1 은 일정하게 증가하고 L_2 는 감소하는 모델을 수립하였다. 또한 테더가 있는 인공위성 시스템의 자전각의 변화는 공전 궤도 평면상에 존재한다고 가정하여 면외각을 고려하지 않은 2 차원으로 모델을 수립하였다. 따라서 본 연구에서는 satellite 1 과 지구중심과의 거리 r , 공전각 ψ , 자전각 θ 의 일반좌표를 선정하였고 질량이 이동할 때 dumbbell 모델의 타당성을 검증하기 위하여 α 의 포지션 각을 추가로 정의하였다.

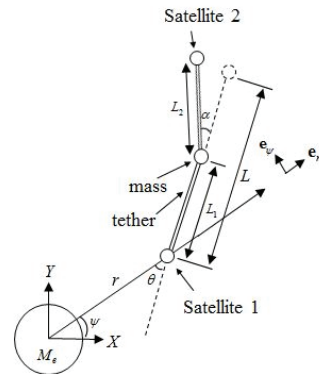


Fig. 1 Simplified model of tethered satellite

2.2 테더가 있는 인공위성의 운동방정식 유도

본 연구에서는 정의된 일반좌표에 의해 표현된 운동에너지와 위치에너지를 Lagrange equation 에 적용하여 시스템의 지배방정식을 유도하였다. 운동에너지

† 교신저자; 한양대학교 기계공학과

E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

Tel : (031) 400-5287, Fax : (031) 406-6964

* 한양대학교 일반대학원 기계공학과

와 위치에너지는 위치벡터와 속도벡터에 의해 나타낼 수 있는데 각 질점과 이동질량에 대한 위치 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r}_1 = r \mathbf{e}_r \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_m = (r + L_1 \cos \theta) \mathbf{e}_r + L_1 \sin \theta \mathbf{e}_\psi \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_2 = [r + L_1 \cos \theta + L_2 \cos(\theta + \alpha)] \mathbf{e}_r + [L_1 \sin \theta + L_2 \sin(\theta + \alpha)] \mathbf{e}_\psi \quad (3)$$

여기서 \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_ψ 과 는 satellite1의 반경방향과 접선 방향의 단위벡터를 나타낸다. (1) - (3)의 위치벡터를 시간에 대하여 미분하여 속도벡터를 구할 수 있는데 이는 (4) - (6)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{v}_1 = \dot{r} \mathbf{e}_r + r \dot{\psi} \mathbf{e}_\psi \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_m = [\dot{r} - L_1(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \sin \theta + \dot{L}_1 \cos \theta] \mathbf{e}_r + [r \dot{\psi} + L_1(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \cos \theta + \dot{L}_1 \sin \theta] \mathbf{e}_\psi \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_2 = [\dot{r} - L_1(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \sin \theta + \dot{L}_1 \cos \theta + \dot{L}_2 \cos(\theta + \alpha) - L_2(\dot{\psi} + \dot{\theta} + \dot{\alpha}) \sin(\theta + \alpha)] \mathbf{e}_r + [r \dot{\psi} + L_1(\dot{\psi} + \dot{\theta}) \cos \theta + \dot{L}_1 \sin \theta + \dot{L}_2 \sin(\theta + \alpha) + L_2(\dot{\psi} + \dot{\theta} + \dot{\alpha}) \cos(\theta + \alpha)] \mathbf{e}_\psi \quad (6)$$

인공위성 모델을 질점으로 가정하였기 때문에 운동에너지는 (7) 식을 이용하여 구할 수 있다. 또한 중력 퍼텐셜 에너지는 (8)과 같이 표현 할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} m_1 \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_1 + \frac{1}{2} m_2 \mathbf{v}_2 \cdot \mathbf{v}_2 + \frac{1}{2} m \mathbf{v}_m \cdot \mathbf{v}_m \quad (7)$$

$$V = -GM_e m_1 / R_1 - GM_e m_2 / R_2 - GM_e m / R \quad (8)$$

정의된 운동에너지와 위치에너지를 (9)과 같이 표현될 수 있는 Lagrange equation을 사용하여 유도된 테더를 통해 물질을 이송하는 인공위성 시스템의 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial V}{\partial q_k} = Q_k \quad (9)$$

3. Tether가 있는 인공위성의 동적 응답 분석

유도된 운동방정식을 바탕으로 matrix-vector 방정식으로 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{N}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (10)$$

matrix-vector 방정식을 Newmark 알고리즘을 사용하여 시간적분을 수행하였다. 이동하는 질량의 크기에 변화시키며 응답을 확인하였다. 1m/s으로 질량을 이동

시키면서 satellite1의 거리변화와 시스템의 자전각 그리고 추가 포지션 각의 시간응답을 Fig. 2에 나타내었다.

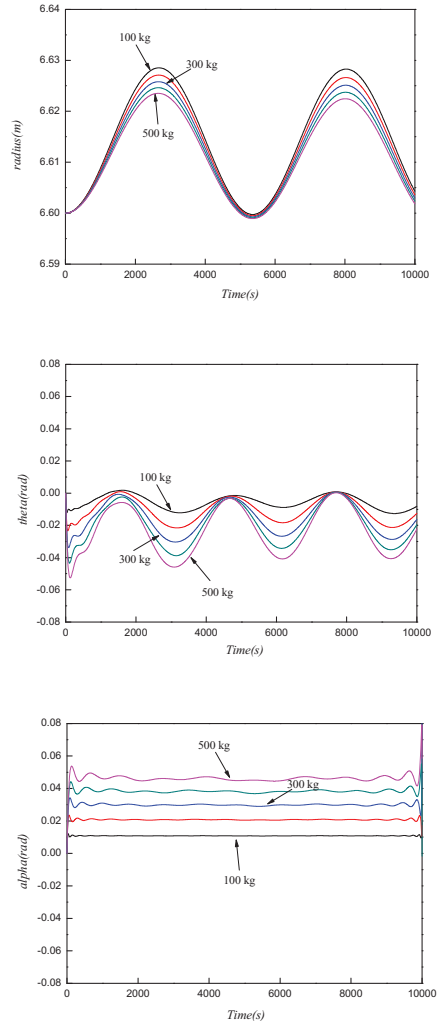


Fig. 2 Dynamic response of the satellite with various moving mass

4. 결론

본 논문에서는 이동질량을 가진 테더가 있는 인공위성의 유도된 운동방정식을 통해 질량의 크기를 변화시키며 시간응답을 확인하였다. 차후에는 테더의 전개 및 테더의 진동이 시스템에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행할 것이다.

후기

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0003907)